

25X1

**Page Denied**

Next 3 Page(s) In Document Denied

M.V.Kozlianinov.

HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS and METHODS of DETERMINING THEM.

The term - HYDRO-OPTICAL CHARACTERISTICS describes the physical-<sup>o</sup>chemical and biological characteristics of ocean, sea, lakes and other bodies of water which determine the conditions of diffusion of light within them. The term "light" in this case means the electro-magnetic radiation concentrated in the so-called optical part of the spectrum, i.e. the radiation contained in the interval of wave-lengths from 0,01 to  $\lambda = 3.40$  . The optical part of the spectrum therefore, is considerably wider than its part that is visible which lies between  $\lambda = 0.4$  to  $\lambda = 0.8$  . Thus the hydro-optical characteristics determine the conditions of radiation in the water of rays of light seen, as well as unseen, by human eyes, the latter belonging to the ultra-violet and infra-red parts of the spectrum. It is necessary to ~~study~~ study the conditions of radiation of these rays because in solving different kinds of problems <sup>dealing</sup> / with reactions of the field of radiation not only on human eyes but on multiple plant and animal bodies, photo - plates , photo-elements, pyranometers etc... Besides the infra-red radiation plays a very substantial part in the exchange of heat between the ocean and the atmosphere.

Until the present there is a lack of strictly differentiated (determined) hydrophotometrical concepts and there is no clearly determined terminology. The same units of measurements are often given different names and vice versa, the same term sometimes indicate different physical units of measurements. This confusion is found not only in our literature but in the foreign publications , especially in literature translated from other languages. As a result different

authors often fail to understand each other - mistakes occur often and sometimes even misinterpretations.

In the first place let us state the definition of the basic hydro-optic characteristics and indicate their dimensions and units of measurements. These measurements are ~~xxxx~~ based wherever it is possible upon the definitions and terminology elaborated and stated in the S.I. Vaviloff Government Optical Institute Statement of Standards ( "G.O.S.T. 7601-55" Optical Physics-Definitions of Basic Measurements ") established in 1956.

It is to be hoped that the publication of such a terminology , to our knowledge non existent in the literature on the subject, will serve to unify and standardize the terms in the field of hydrophotometry and will dispel thus the lack of clarity and confusion in this branch of scientific research.

The theoretic basis of hydrooptics, the most important foundation of which consists of the problem of diffusion and radiation of light in troubled ( unclear) mediums, has been studied in great detail. The works of <sup>12</sup>volsson, Mee, Gershon, Hamburtzev, Shulejkin, Fokk, Joseph, and the recent research works of Ambartzumjan and of the School of Soviet Astro-physics<sup>8</sup> of which he is the director, present very fully the complex laws governing the optical processes that take place in various bodies of water . Things have not progressed so well as far as methods and techniques of hydrophotometric measurements are concerned, and consequently in the field of our knowledge of hydro-optical characteristics of water in oceans and various seas. The absence of standardized apparatus of measurements and insufficient development of methods of observation by means of existing single (variable) and experimentally used apparatus result in crude and primitively

M.V.Kozlianinov.

made observations and a technique of measurements that is obsolete in view of contemporary possibilities.

As the research work in hydrooptics progressed in the Institute of Oceanography of the Academy of Sciences of the USSR, it was taken into consideration that the first problem in this field would be the perfecting of the existing and the development of new methods of hydrophotometric research. It is natural, therefore, that the first step in this direction should be the creation of a standard measurement apparatus based on the use of contemporary technical means, in particular - on electronic and semi-conductivity (?) techniques.

On the basis of the data obtained from the use of various experimental/ instruments built during the last few years by the S.I. Vaviloff <sup>Optical</sup> ~~Government~~ <sup>the</sup> Institute, ~~xx~~ Oceanography Institute of the Academy of Sciences of the USSR, together with <sup>the</sup> ~~Government~~ Institute of Oceanography and others - different technical conditions were developed for projecting and manufacturing a group of standard hydrooptical apparatus consisting of four instruments and an order was placed for their production. Besides, in order to insure the possibility of making observations during the ship's motion and for special measurements of very dim lighting in great depths the Institute of Oceanography of the Academy of Sciences has developed and produced another two ~~xxxxxx~~ experimental models of hydrooptical instruments.

In this article are given: a/ a list of hydrooptical characteristics, b/ some basic theoretical premises necessary as basis for various methods of measurements and for the study of interdependencies between different optical characteristics. It is followed by a description of new hydrooptical instruments together with the statement of basic problems connected with contemporary methods of hydrophotometrical



measurements. The treatment of problems/<sup>in the study of methods/is/</sup>based on data found in literature, <sup>to</sup> ~~in~~ a considerable extend in the research results achieved during the cruise of S.S."Vityaz", and the works of the Institute's Scientific Experimental Station on the Black Sea.

The article closes with a study of interdependencies between hydrooptical characteristics. This study is of a very definite interest due to the fact that direct measurements of these demand/ the use of special instruments. On the basis of these interdependencies obtained theoretically and discovered experimentally, <sup>the</sup> ~~by~~/research work on the seas can be limited to a minimum number of measurements. It is obvious that the knowledge of these interdependencies is absolutely necessary in order to obtain a correct idea of optical processes in the waters of the seas. The empirical connections between the depths at which the standard white disc is visible and some basic optical characteristics/ are not being discussed in this article as they will be exposed in a special article devoted to the study of conditions of visibility of underwater objects.

-----  
I/ BASIC HYDROOPTICAL CHARACTERISTICS.  
Definitions and specifications.

Before defining hydrooptical characteristics let us note that in hydrophotometries it is more convenient to use not the units of light measurements, but units of energy ( Sena 1949 ) - i.e. to operate not with concepts of ~~energy~~ of "the flow of light", "brightness", "irradiation" etc....., but with concepts of " radial flow", "energy/ radiation", energy lighting" etc..... As it has been mentioned before, in hydrooptics we study not only the radiation that can be seen, but the ultra-violet and

M.V.Kozlianinov.

infra-red radiations. So, in solving problems one may encounter reactions of the field of radiation upon very different receptacles. Their curves recording sensitivity to spectral radiation may substantially differ from the curves recording the sensitivity to spectral radiation of the human eye. It is well known that units of energy (energetics' units) are quite free of any physiological peculiarities of human sight, whereas units of lighting depend upon these peculiarities. In case of necessity the transition from units of energy to units of lighting can be realized very simply. For this we have to know the so-called relative visibility of the given receptacle of radiation, i.e. visibility function

where  $\lambda$  is the wave length of radiation.

In further discussion under terms of - flow, brightness, light power, lighting, etc... we mean units of energy.

Let's put out into the sea  
an infinitely small unit of volume  
 $dv = dq \cdot dz$  (Pic. I). Let a flow of  
monochromatic rays fall upon the  
upper surface  $dq$  of this unit.

We will mark the flow of rays falling  
upon the upper surface of the unit  
of volume by  $\Phi$ , and the field of  
light created by it by  $E$ .

Pic. I. Schematic design of the  
definition of indicators  
of absorption, diffusion  
and diminution of light  
in sea water.

By the passing of the flow  $\Phi$  through the unit of volume  $dv$   
part of it  $d\Phi_x$  will be absorbed, and part  $d\Phi_y$  - diffused.  
The amount of energy absorbed and diffused in sea water is determined  
accordingly by its indicators of absorption and diffusion, which  
belong to the number of the most important hydrooptical characteristics.

By an indicator of absorption  $x$  of sea water is understood a unit of volume inversely proportional to the distance in which the flow of monochromatic radiation forming a parallel cluster (shaft) is weakened 10 times as a result of absorption. The indicator of absorption can be determined also as a unit of volume equal to the ratio of the flow of radiation forming a parallel cluster (shaft) and which is absorbed by one unit of volume of sea water, to the lighting created by this flow on a plane surface perpendicular to it.

$$\gamma = - \frac{M \frac{d\Phi_{0x}}{dz}}{\Phi_{0dz}} = - \frac{M \frac{d\Phi_{0x}}{dv}}{\Phi_{0dv}} \quad (1)$$

where  $M = 0.4343 \dots$  ... modulus of decimal logarithms.

The indicator of diffusion  $\sigma$  of sea water is a unit of volume inversely proportional to distance in which the flow of monochromatic radiation forming a parallel cluster is weakened 10 times by diffusion. The indicator of diffusion can be determined also as a unit of volume equal to the ratio of the flow of radiation that forms a parallel cluster and is diffused in a unit of volume of sea water, to the lighting created by this flow upon a plane surface perpendicular to it.

$$\sigma = - M \frac{\frac{d\Phi_{0\sigma}}{dz}}{\Phi_{0dz}} = - M \frac{\frac{d\Phi_{0\sigma}}{dv}}{\Phi_{0dv}} \quad (2)$$

It follows from these definitions that the dimension of indicators of absorption and diffusion is inversely proportional to the dimensions of length: i.e.  $[x] = [L^{-1}]$  and  $[\sigma] = [L^{-1}]$ .

In hydrooptics these indicators are usually measured in reversed(?) meters.

As a result of combined action of processes of absorption and diffusion the flow of radiation  $\Phi_{0x}$  that entered the unit of volume  $dv$  experiences a general weakening, i.e. a part of it

$\Phi_{0x} = d\Phi_{0x} + d\Phi_{0\sigma}$  - will not flow in the first (original)

M.V.Kozliianinov.

direction. The summary quantity of radiation absorbed and diffused in water, is defined by the indicator of weakening which represents also one of the most important optical characteristics of sea water.

The indicator of weakening of sea water is called a unit of volume inversely proportional to distance in which a flow of monochromatic radiation forming a parallel cluster (shaft of light) is weakened 10 times/ as a result of a joint action of absorption and diffusion.

The indicator of weakening may be also defined as a unit of volume equal to the ratio of the flow of radiation forming a parallel cluster (shaft of light) weakened by the result of absorption and diffusion in a unit of volume of sea water - to the lighting created by this unit volume upon a plane ( flat ) surface perpendicular to it.

(3)

It is obvious that ..... (4)

The dimension of the indicator of weakening is the same as the dimension of the indicator of absorption & diffusion, i.e.

$$[I] = [L].$$

The indicator is measured, as the indicators  $x$  and  $\delta$ , in inverse (reverse?) meters.

In the Russian as well as in foreign literatures indicators of absorption, diffusion & weakening are used which are defined not by

10 times weakening of lighting but by  $e$  times, ( where  $e$  - represents the basis of ~~common~~/natural/ logarithms. ) In this case these units of volume are called "natural"/of absorption  $x$ , diffusion  $\delta$  and weakening  $I$ .

It is obvious that:

$$x = Mx, \quad \delta = M\delta, \quad \text{and} \quad I = MI. \quad (5)$$

According to the equation of the transfer of radiation, the flow of monochromatic rays passing through a certain distance through a homogeneous

body of water without a change of direction, is deducted from a proportion:

$$\frac{dI}{dz} = -K I$$

The integration (integral) of this equation results in the very well known Beer's representative law of weakening:

$$I = I_0 e^{-Kz} \quad (6)$$

The equation (6) allows to define two very important optical characteristics of water - transparency & the coefficient of filtration.

The coefficient of filtration gives in its turn a definition of optical density.

The term - coefficient of ~~filtration~~ filtration T of sea water is applied to the ~~ratio~~ of the flow of radiation through a certain layer of water to the flow of radiation falling upon that layer:

$$T = \frac{I_0 - I}{I_0} = e^{-Kz} = 10^{-D} \quad (7)$$

The unit of volume  $K^{-1}$  is called the optical depth. From the ~~xxx~~ equation (7) it follows that the coefficient of filtration T is a non-dimensional unit.

The decimal logarithm of a unit of volume inversely proportional to the coefficient of filtration is termed the optical density D

$$D = \lg \frac{I_0}{I} \quad (8)$$

The transparency T of sea water is the term applied to the ratio of the flow of radiation that passes through the water without changing its direction a distance  $z$  to  $I$  point, to the flow of radiation that entered into the water as a parallel cluster (shaft of light). In other words, the term transparency of sea water is applied to the coefficient of filtration for a uniform layer of a unit of density ( $K^{-1}$ ).

From the equation (7) it follows that:

$$T = e^{-D} = 10^{-D} \quad (9)$$

- 9 -

M.V.Kozlianinov.

$\epsilon$  is a non dimensional unit.

For the units of volume  $T$  and  $\epsilon$  this condition is always observed:

$$\epsilon \leq T \leq 1 \text{ and } 0 \leq \epsilon \leq 1.$$

The formula ( 9 ) shows that the indicator of weakening is equal numerically to the absolute numerical quantity of the decimal logarithm of transparency:

$$\epsilon = /lg \epsilon/. \quad ( 10 )$$

Therefore , units  $\epsilon$  and  $T$  define each other identically.

If we will study the elementary unit of volume of water ( Pic.I )  $dv$  lighted by the flow of radiation  $E$  from a certain distance in direction  $E$  forming an angle  $\gamma$  with direction of falling rays, because of diffusion, this unit will be lighted and will become a source of radiation in this direction possessing the power and energy of light:

$$dI = \frac{I}{4\pi} S(\gamma) E dv = E \frac{E}{4\pi} dv \quad ( II )$$

Where  $S(\gamma)$  - is the natural indicator of diffusion in a given direction (Gershon 1958 ). By  $E$  in this equation is shown the natural indicator of brightness of sea water, and by  $E$  - the lighting of the upper facet of the unit of volume.

It is known that the brightness  $B_0$  <sup>omit</sup> ~~of an ideally white surface~~ perpendicular to the direction of light, is determined as follows:  $B_0 = \frac{E}{4\pi}$ .

Substituting the formula for  $B_0$  in equation ( II ) we obtain an equation which makes it possible to define one more important hydro-optical characteristic - the indicator of the brightness of ~~light~~ water.

By the term :indicator of brightness  $\epsilon$  of sea water we call

- I) Here and in the following discussions under ideally white non-shiny surface we assume a surface non transparent, non light absorbing and not diffusing it.

M.V.Kozlianinov.

the ratio of the power of light diffused in a given direction by a unit of volume of water, to the brightness of an ideally white non shiny surface which is perpendicular to the direction of rays that light the given volume of water:  $\beta' = \frac{dI}{E_{\text{sd}} dv}$  ( 12 )

It follows from this equation that the dimension of brightness is inversely proportional to the dimension of length  $[B] = [L^{-1}]$ . The indicator of brightness is usually measured in unit of inversely meters.

If from the center of the diffusing/volume vektors are laid out equal in their dimension to the indicator of brightness  $\beta'$ , the surface that surrounds the ends of these vektors will represent the dimensional distribution of the energy of the diffused light around the given unit of volume of water. Such a surface is called the indicatress of the indicator of brightness  $\beta'(\tau)$ . For non polarized light this surface is symmetrical in relation to any plane that passes through the direction of the falling rays. Therefore, the indicatress of the indicator of brightness may be represented by a flat curve which characterizes the distribution of the energy of diffused light in relation to the angle of diffusion. A full characteristic of conditions of diffusion of non polarized light in sea water will be given by the spectral indicatresses of the indicator of brightness  $\beta'(\tau, \lambda)$ , where  $\lambda$  is the length of radiation.

The general flow diffused by the elementary volume  $dv$  in all directions, will be defined thus:

$$dR = \int \beta' d\omega \quad ( 13 )$$

where  $d\omega$  is the elementary body angle, the axis of which forms the angle  $\tau$  with the direction of the falling rays.

- II - M.V.Kozlianinov.

From the equations (2) & (13) discounting (II) it follows that the ~~max~~ indicator of diffusion is =

(14)

where M - as before is the module (coefficient) of decimal logarithms.

because

(15)

so instead of (14) we finally obtain the coordination that serves for the calculation of the indicator of diffusion according to the measurements B ( ):

(16)

In works treating the theoretical side, as well as in those treating the results of measurements and in elaborating different calculations often the indicatress of diffusion is used  $-x( )$  instead of the indicatress of brightness. If the we mark the potential of diffusion of radiation inside the solid angle  $\underline{dw}$  by  $x( )_{4}^{dw}$ , we obtain the following obvious condition

$$x( )_{4}^{dw} + I$$

or, taking into consideration (13):

(17)

From equations (16) & (17) it follows that

(18)

If through the center of the volume of diffusion we pass a flat surface which will be perpendicular to falling rays, the shafts of light ( flow of diffused radiation flowing on both sides of this surface ~~are~~ will considerably differ one from another. From the view point of molecular diffusion<sup>only</sup> conditioned by fluctuations of the surface these shafts of light are equal and conform to to the spherical form of the



indicatress of diffusion ( the so-called indicatress of Riley ? )  
 The incatresses of diffusion of even the purest of <sup>ocean/</sup>waters are consider-  
 ably drawn forward, i.e. in the direction of falling rays and assume  
 the form of a dagger. The difference in the shafts of light directed  
 forward and backward from the limit of the above mentioned surface,  
 ( or, in other words, the assymetry of the indicatresses of diffusion),  
 defines to a great extent the conditions of the spreading of light in  
 the sea. Therefore ~~xxxxxxxxxxxx~~ it becomes necessary to obtain  
 quantitative characteristics determining the difference in these shafts  
 of light( flow ) The indicators of diffusion forward and backward <sup>k</sup> are  
 considered as these characteristics.

We call the component of the indicator of diffusion determining  
 the ~~the~~ part of the flow of the shaft of light of diffused radiation -  
the indicator of diffusion forward . It spreads in the limits of the  
 body angle  $2\pi$  steradian, its axis <sup>coinciding</sup> ~~beingxxxxxxxx~~ with the direction of  
 the falling rays of light.

( 19 )

We call the component of the indicator of diffusion determining  
 the part of the flow of the shaft of light of diffused radiation -  
the indicator of diffusion backward . It spreads in the limits of  
 the body angle  $2\pi$  steradian, its axis going counterwise the direction of  
 the falling rays of light.

( 20 )

It is evident that the indicator of diffusion  $I$  is equal to the sum  
 of these indicators i.e.  $I = I_f + I_b$  ( 21 )

Often it is important to know which part of the entire diffusion of radi:

is concentrated in the cone limited by angles  $\alpha$  and  $\beta$ , or the meaning of the function

( 22 )

One must point out that equations (3) and (10) which served to define the indicator of weakening, and the equation (6) that expresses the law of Booger(? spel.) are correct for a directed monochromatic radiation only, diffused (spreading) in a homogeneous medium. At the same time in practice one has to operate with the spread of daylight in the sea which is not only non monochromatic (complex), but mixed (directed and diffused) radiation. For this reason the concept of the indicator of vertical weakening has been introduced into hydrooptics. This indicator characterizes the modification (change) of natural light in connection with depth. Numerous experiments made in different times by various authors completely concur in showing that daylight, at its first approach to the sea water, is weakened in accordance with depth penetration as demonstrated by/  
~~confirming~~ the law:

( 23 )

where  $S_z$  - is the flow of nonmonochromatic mixed radiation in depth  $z$ ;  $S_{z_1}$  - the flow of the same radiation in depth  $z_1$ ;  $z = z_2 - z_1$  - the thickness of the water layer.

By indicator of vertical weakening  $K$  is called a unit of volume inversely proportional to distance in which the flow of natural light is weakened 10 times, as the result of combined action of absorption and diffusion. according to equation (23), the indicator of vertical weakening can be defined also as  $\frac{1}{z}$  the difference of logarithms of the flow of natural light upon the upper and lower surfaces of the layer of water, as related to its thickness:

( 24 )

- I4 - M.V.Kozlianinov.

Analogous to the concept of the natural indicator of weakening the concept of the natural indicator of vertical weakening can be introduced:  $a = M \cdot L$ .

From equation (24) it follows that the dimension of the indicator of vertical weakening is inversely proportional to the dimension of length:

$a = 1/L$ . The indicators  $a$  and  $b$  are usually measured in inverse meters.

The change of  $\frac{\text{day}}{\text{light}}$  spread in the sea in relation to depth is termed the coefficient of underwater lighting  $K_z$ . - it represents the relation of lighting  $E_z$  of a certain surface in the sea at depth  $z$  to the formula of lighting of  $\infty$  underwater  $E_\infty$ . This formula represents the lighting of a horizontal surface directly under the surface of the sea and thus lighted by a flow of natural light that has already undergone reflection and refraction upon this surface. Then

( 25 )

In the majority of cases the ~~surface~~  $\frac{\text{horizontal}}{\text{upper lighted surface } E_\infty}$  and the  $\frac{\text{horizontal}}{\text{surface lighted from below } E_z}$  are studied in different depths. The graph of the function  $K_z = E_z/E_\infty$  gives a fair view of the character of vertical distribution of lighting created by natural light.

The coefficients of diffused reflection and brightness of the sea ~~from~~ belong to the number of very important hydrooptical characteristics.

We call ~~the~~ coefficient of diffused reflection of the sea the relation of the flow of diffused radiation  $R$  penetrating to the depth  $z$  to the surface of the sea, and to the natural ~~from~~ radiation  $E_\infty$  going vertically into the same depth/down into the sea:

( 26 )

The term COEFFICIENT OF THE BRIGHTNESS OF THE SEA is applied to the relation of the diffused brightness  $B_z$  coming from the thickness of the layer of sea water immediately under the sea surface, ~~in~~ in the

direction determined by the angles  $\theta$  and  $\varphi$  ( where  $\theta$  is the zenith distance and  $\varphi$  - the azimuth ) to the brightness  $B_0$  of an ideally white dull surface (non shiny ) lighted by natural light:

( 27 )

where  $E$  - is the lighted surface of the sea.

The dependence of the coefficient of brightness of the sea from the length of the wave of radiation  $\lambda$  characterizes the distribution of energy in the spectrum of radiation emerging from the layer of sea water and ,therefore, determines its proper color.

From these definitions we see that the coefficients  $\rho$  and  $\sigma$  are non dimensional units of volume.

In the process of diffusion light is partly polarized. Because of that it is necessary to obtain the characteristics of polarization of light in sea water. The degree of polarization  $P$  and the degree of depolarization  $Q$  are basic for this.

We call the degree of polarization the relation of maximum between two flows of mutually perpendicularly polarized components, into which a given partially polarized radiation may be divided, to the sum of this flows:

( 28 )

where  $\rho_{\parallel}$  = to the flow of partially polarized radiation the electric vector of which lies in the plane of diffusion, and  $\rho_{\perp}$  - the flow of the same radiation, the electric vector of which is perpendicular to this plane (surface ).

I/ In distinction of the seen color of the sea which depends of the condition of the sea surface, the cloudiness and sight angle of the observer, the proper color of the sea is determined by the physico-chemical characteristics only in a certain region ,and therefore ,it can & must interest oceanographers, hydrographers, navigators, etc.....

~~Thaxxx~~

$$\text{Volume } G = \frac{I - P}{I + P} \quad (29)$$

is called the degree of depolarization.

It is not always taken into consideration that indicators of weakening, absorption and diffusion for a directed radiation often deviate in their value from the same indicators for diffused radiation. Nevertheless this difference is not mentioned in the special literature on the subject. Let us define these characteristics in the following way. The indicator of absorption of diffused radiation  $\mu_0$  - a unit of volume inversely proportional to distance in which the flow of completely diffused radiation is weakened 10 times as a result of repeated diffusion.

The indicator of diffusion of diffused (?) radiation  $b$  - is a unit of volume, inversely proportional to the distance in which the completely diffused flow of radiation is weakened 10 times as a result of repeated diffusion.

We have given above the definitions of indicators of diffusion in the forward direction and in the backward direction for directed radiation. We will introduce the same concepts for diffused radiation as we did for the often observed cases of diffusion of light from the surface in the direction of the depth ~~sixthaxdepth~~ of the sea, and in the opposite direction.

We will term as indicator of ~~diffused~~ diffusion (?) of <sup>diffused/</sup>radiation forward the component of the indicator of diffusion  $b$ , which determines the part of the flow of completely diffused radiation which spreads in ~~ax~~ the sea in the limits of the body(?) angle  $2\pi$  steradian, whose axis is directed vertically <sup>down</sup> ~~up~~ towards the <sup>depth</sup> ~~surface~~ of the sea.

We will term as indicator of diffusion of diffused radiation backward the component of the indicator of diffusion  $b$  which determines the part of the flow of completely diffused radiation spreading in the sea in the limits of the angle  $2\pi$  steradian, whose axis is directed vertically <sup>up</sup> ~~down~~ towards the surface of the sea.

M.V. Kozlianov.

$\frac{1}{e}$  a unit inversely proportional to distance in which the flow of completely diffused radiation is weakened <sup>10 times</sup> ~~by~~ as a result of simultaneous action of absorption and diffusion.

It is obvious that

$$c = a = b. \quad (30)$$

$$b = \frac{1}{e} \quad (31)$$

As before, by  $a$ ,  $b$  and  $c$  we will call the natural indicators of absorption, diffusion and weakening respectively; in this case  $a = 0,43 a$ ;  $b = 0,43 b$ ;  $c = 0,43 c$ .

In conclusion let's mention that as we use the generally accepted term of the distance of optical visibility in meteorology, and in particular, in atmospheric optics - so we use the term of depth of visibility in hydrooptics.

The term depth of visibility  $H$  of any unit or object indicates the limit of distance at which this object, being accessible to observation, is seen at given conditions of lighting in given optical characteristics of sea water.

The terms "transparency" and "coloring" of sea water ~~xxxxxx~~ have been widely studied in oceanology. The term "transparency" applies to the depth at which a white standard disk, ~~ix~~ plunged in sea water, can be seen. It is measured in meters. It is quite obvious that this unit of measurement is not at all equal to the transparency of water in the ordinary physical meaning determined by equation (9). Therefore, in order to avoid inexactitude, in the discussion following the results of measurements using the disk will be termed as depth of the visibility of the disk or a relative transparency  $h$ . We will call the coloring of sea water  $C$  the number of the solution

M.V. Kozlianinov.

on the standard scale of coloring, the shade of which is the nearest to the coloring of a column of water over the disk at the observation spot.

## 2. Some Basic Principles of the theory of diffusion of radiation in the sea.

Not entering into detailed examination of complex laws of diffusion of radiation in the sea which goes beyond the limits of this work, let us discuss a few basic theoretical principles, indispensable for the choice of methods of measurements hydrooptical characteristics and the study of their inter-dependence. For this objective we will use the research publications of V.A. Ambartzumian (1943, 1944), A.G. Hamburtzev (1924) and I. Joseph (1950).

The question of computing the process of lighting in the sea is reduced to the solution of the equation showing the spread of the radiation in an absorbing and diffusing medium, i.e. to the solution of the so called equation of transference of radiation which can be registered in the following fashion:

$$\frac{dJ}{dl} = J + 1. \quad (32)$$

By  $J$  we mark the intensity of radiation spread in a medium in the direction  $\underline{l}$ ; by  $\underline{l}$  - the coefficient of radiation, and by  $-$  the natural indicator of weakening. In problems of hydrooptics one can dispense with the radiation of the sea itself and consider that the radiating capacity of sea water is equal to her diffusing capacity. In that case the coefficient  $\underline{l}$  will show the amount of energy diffused by a unit of volume of water in a unit of a body angle (?), the axis of which forms the angle with the direction of falling rays of light:

( 33 )

This equation is called the equation of the equilibrium of light rays.

Let's study now the simplest case - the weakening of the directed flow ( i.e. of direct rays of the sun ) spreading vertically into the depth of the sea in the direction of axis  $z$  . The equation of the transference of radiation will be written thus:

$$\frac{dJ}{dz} = - J. \quad ( 34 )$$

By integrating this equation and going from the intensiveness of radiation to the flow we will obtain the above mentioned law of Booger:

( 35 )

It follows from simple geometric considerations that, if the rays of sunlight are falling on the sea surface not perpendicularly but under a certain angle,  $\theta$ , where  $\theta$  - is the zenith distance of the sun, then in case the surface of the sea is smooth, the flow of directed radiation, having reached the depth  $z$  will form:

(36.)

where  $\theta$  is the angle of refraction of rays of the sun, bound (connected) with the zenith distance of the sun by a simple coordinate:

( 37 )

where  $n$  represents the indicator of refraction of sea water.

Having assumed that in the indicator of degree by  $e$  in formula (36)  $1 = (\sec \theta)^2$ , which correlates to the formal replacement of increase of distance of directed radiation by the increase of amount of  $\theta$  the indicator of ~~weakening~~ weakening, Booger's law can be transcribed thus:

$$J = J_0 e^{-n^2 z}. \quad ( 38 )$$

It was noted above that in this form Booger's law is correct for the directed monochromatic radiation spreading in a homogeneous



M.V.Kozlianinov.

medium. In a non homogeneous medium, but with monochromatic radiation, instead of ( 35 ) we have

( 39 )

When a flow of monochromatic, but directed radiation (i.e. a flow of straight sun rays) , falls in the sea, in this very comparatively simple case the variation in connection with depth of this flow cannot be expressed by the simple law of weakening; because the indicator becomes dependent on the distribution of energy in the radiation spectrum. This distribution continuously changes as related to depth because of the selectivity of the processes of absorption and diffusion. Therefore, even in case of a homogeneous medium, the indicator will represent the function not only of the length of wave, but of depth  $z$ ;  $i = i(\lambda, z)$ . Now, let us introduce the concept of a certain median value of indicator for the flow of radiation enclosed in the interval of the length of waves  $(\lambda, \lambda + d)$  and spreading from the surface of the sea to depth  $z$ . By virtue of the law of spectral additiveness the flow of monochromatic radiation in depth  $z$  may be presented thus:

(40)

where  $i$  - is the flow of monochromatic radiation contained in the interval of length of waves  $(\lambda, \lambda + d)$  in depth  $z$ .

The median value  $\bar{i}$  can be deducted from equation ( 35 )

( 41 )

where  $k$  - is the indicator of the weakening of monochromatic radiation in the interval of length of waves  $(\lambda, \lambda + d)$ .

Then the law of weakening of the flow of non-monochromatic radiation

M.V.Kozlianinov.

but directed radiation appears thus :

( 42 )

For the case of spreading of duffused radiation going under the angle  $\theta$  towards the vertical V.A. Ambartzumian (1943) solves the equation of transfer of radiation thus:

( 43 )

where  $\tau$  represents the optic depth,  $b(\theta)$  - a certain function dependent on the angle of distribution of radiation energy,  $k$  - a parameter dependent on the indicatress of diffusion and on the correlation between the diffusion and the general weakening.

For chiefly diffusing media parameter  $k$  is determined by

( 44 )

where  $s$  - is the part of diffusion in general weakening,

$s = \frac{S}{\xi}$ , and  $x_1$  - is the first coefficient in the dissociation of the indicatress of diffusion in the range according to Legendre's polynomials.

$$x_1 = -\frac{3}{2} \int_0^\pi x(\gamma) \cos \gamma \sin \gamma d\gamma.$$

We are going to study the ~~xxxxxxxxxxxx~~ the basic rules of the most general case of the spreading in the sea of mixed, that is to say simultaneous directed and diffused radiation ( i.e. of natural light of sunshine ~~not~~ when the sun is/covered by clouds ) on the basis of scientific research works of A.G.Hamburtzeff, (1924) and Joseph ( 1950 ). We will limit our study of cases when the sea is deep enough, so that there can not be any reflection/of light from the bottom that would influence the intensity of spreading in the sea radiat. Such a situation is wholly possible for in a distance equal to the depth of sighting the disk, the "albedo" ( ? ) cannot be observed in practice.

M.V. Kozlianinov.

To study the rules of changes of the flow of radiation  $\underline{S}$  which is near  
 to the diffused one, <sup>which is</sup> ~~and~~ moving in the direction of the depth of the sea,  
 and of the flow  $\underline{R}$  which is spreading in sea in a vertical direction  
 towards the surface of sea, Hamburtzeff composes the following equations  
 which represent the equations of transfer of radiation in detail  
 ( but ~~xx~~ presented in our own markings.)

( 45 )

Hamburtzeff solves these equations together (in conjunction) with  
 magnitude  $\frac{R}{S}$  which is, according to definition (25), the coefficient  
 of the diffused reflection of sea. This is the equation:

( 46 )

Let us remind the reader that  $\underline{a}$  marks the indicator of absorption, and  
 $\underline{b}$  - the indicator of inverse diffusion of diffused radiation.

Let us study now the spreading in the sea simultaneously of  
 directed and diffused radiation. Let us isolate in depth  $\underline{z}$  from the  
 general flow of radiation  $\underline{S}$  its component  $\underline{F}$  which represents the  
 pure diffused flow and let us mark, as before, the directed flow by  $\underline{D}$ .  
 In this <sup>to</sup> case/the system of equations ( 45 ) by Hamburtzeff one must  
 add parts  $\frac{\partial F}{\partial z}$  and  $\frac{\partial D}{\partial z}$ , which represent~~xx~~ the change in the flows  
 $\underline{F}$  and  $\underline{D}$  caused by addition of components of diffused forward ( indicator  $\underline{b}$  )  
 and backward (indicator  $\underline{a}$  ) radiation from directed flow  $\underline{D}$ . Then,  
 instead of equation (45) we will obtain:

( 47 )

The third equation in this series represent several times mentioned above equation of transfer of radiation of directed flow ( 34 ). Let us introduce the same limiting conditions as in the integration of equation ( 34 ), that is to say let us assume that:

$$Q_0 = Q_0, \quad F_0 = F_0 \quad \text{and} \quad S_0 = S_0$$

In other words, let's mark by  $Q_0$ ,  $F_0$  and  $S_0$  respectively the flow of directed, diffused and general (mixed) radiation, which has just entered under the surface of the sea. It is obvious that

$$S_0 = F_0 + Q_0.$$

Joseph solves the system ( 47 ) ( going from natural indicators to decimal and keeping our markings ) in this manner:

( 48 )

The equations use the following symbols:

( 49 )

The rest of the symbols are the same.

The physical meaning of parameter  $g$  becomes clear following these considerations. If only the diffused radiation is spread in the sea, ( i.e. in the event of complete cloudiness, of ~~diffux~~ spreading of light in sufficiently great depths, of considerable distance of the source of artificial light, etc.... ) - then the equations( 48 ) will be considerably simplified, for  $Q_0$  becomes equal to zero, and  $S_0 = F_0$ . Then

( 50 )

M.V. Kozlianinov.

One can easily see that the first equation is completely identical with Booger's law, and the parameter  $q$  is nothing else but the indicator of weakening of diffused radiation in sea water -

( 5I )

In conclusion we note that equations (48) and (50 ) are correct only for monochromatic light. In precision calculations of the spread of non-monochromatic radiation the "magnitude" ( value ) of indicators  $\epsilon$  and  $q = \underline{q}$  must be replaced by their mean "magnitudes" (values ) which are calculated like in ( 4I ).

### 3. Basic problems of methods of hydrooptical measurements.

In hydrooptical research of any sea or ocean region the following problems are considered as basic: 1/ obtaining spectral characteristics of transperance of water in different depths; 2/ calculating the light regimen of the sea, that is calculating the field of radiation created by natural lighting in any point of a stratum of water.

For the solution <sup>of</sup> /the first of these problems the knowledge of indicators of weakening of the light in different parts of the spectrum is <sup>only</sup> required. These indicators are determined by organic and inorganic <sup>1</sup> calcium containe<sup>d</sup> colored/ dissolved/ in the water and in the organic matter ~~diffused~~ in the water.

The calculation ~~of the~~ of the lighting regimen of the sea is reduced to the solution of the equation of transference of radiation. We conclude from the paragraph above and from the consideration of interrelations between different hydrooptical characteristics <sup>mentioned/</sup> below, that for the solution of this equation it is necessary to know

M.V.Kozlianinov.

the following : the "magnitude" of the indicators of absorption, diffusion and weakening of light in water, the indicatress of diffusion, the indicator of vertical weakening and the coefficient of diffused reflection of the sea. A number of practical problems correlated with the sighting of underwater objects and their masking (concealment) necessitates, besides, the knowledge of the coefficient of brightness of the sea. It is necessary to have complete data of spectral characteristics of elements of weakening radiation in the sea which will be mentioned below. <sup>This</sup> ~~It~~ is needed for a complete calculation of the light regimen of the sea as well as for finding answers <sup>to</sup> ~~for~~ many questions arising from the development of techniques of study of the sea and the modern set up of hydrobiological research.

For determining the hydrooptical characteristics direct as well as laboratory methods can be used. Measurements can be made by apparatus dipped into the sea, or by the study of samples of sea water with apparatus in the ship's laboratory. Some of the characteristics mentioned above, such <sup>as</sup> ~~x~~/i.e. the indicator of vertical weakening and the coefficients of brightness and diffused reflections in the sea may be determined by direct measurements only. Others, as i.e. the indicatress of diffusion may be measured at present only in laboratory conditions. One of the most important optical characteristics - the spectrum transparency of sea water which determines the sea water's indicators of <sup>c</sup>spetrum weakening can be measured both by direct and laboratory methods. The direct measurements the value of which is quite obvious, possess at the same time an important defect - the fact that the depth of immersion of modern optical apparatus connected by cable with the ship, is very limited and does not go beyond 150 - 200 meters.

M.V.Kozlianinov.

and only seldom ( if very light and solid ~~machines~~ carrying core sampling cables are used ) reaches the depth of ~~XXXXXX~~ 400 - 500 meters. Measurements of samples of sea water obtained by bathometers can be made at very great depths. For instance, research ~~on~~ the expeditionary ship "Vityaz" was dealing with the study of optical characteristics at depths reaching 9400 meters. It is easier to make measurements of the different regions of the spectrum in a laboratory, and the quality of the measurements is not influenced by conditions of weather. But a great defect of laboratory research is the impossibility of detailed probing of the vertical distribution of optical characteristics, whereas in direct measurements the "magnitude" ( value ) of these characteristics can be determined <sup>very</sup>/often. The latter fact is very important in the study of strata of water containing an increased amount of phyte - and zoo plankton, in the determining of the locality <sup>of the</sup>/strata of the layer of discontinuity of density, etc.....Therefore, both methods have definite good and bad points, and both of these groups do not exclude, but, to the contrary, complement each other and in the process of research may be used jointly.

I/ Direct measurements of optical characteristics of sea water.

a/ Measurements of underwater lighting.

The measurements of underwater lighting according to equations (24 ), ( 25 ) and (26) permit us to find the following hydrooptical characteristics: the indicator of vertical weakening, the coefficient of underwater lighting and the coefficient of diffused reflection of the sea. The obtaining of this "magnitude" besides the measurement of the lighting from above of horizontal surfaces disposed in the sea at different depths, / requires also the measuring of lighting of these

surfaces from below - a lighting created by diffused light spreading in the sea from deeper strata to the surface. In connection with the fact, that the lighting of sea surface may be subjected to very sharp and great changes which certainly are reflected in the changes of underwater lighting, all measurements of this "magnitude" (amount?) must be necessarily made in conjunction with measurements of surface lighting.

We use the electric photometer ~~PM 57~~ - 57 for measuring underwater lighting. This apparatus consists of a underwater part ( ( Picture 2 ) and <sup>of a/</sup> registering apparatus on board ship connected by a cable. The underwater part represents a hermetically closed body ( I ), in which five photoelements are enclosed ( 2 ). Four of them are ~~xxx~~ placed having their surface sensitive to light turned upward, to the sea surface; the fifth has its surface sensitive to light turned towards the bottom of the sea. Out of these four photoelements ~~xxxx~~ three are covered with light filters, so as to allow the possibility of measuring not only by white light, but by the light of the three parts of the spectrum that can be seen. All the photoelements are placed behind protective bulkheads of <sup>"milk"</sup> opaque glass ( 3 ). The use of this glass has a double purpose. In the first place, without them, because of the phenomenon of complete inner reflection on the lower surface of the protective bulkheads, the photoelements would be reached <sup>only</sup> by rays whose angles with the vertical would be smaller than  $48,5^\circ$ , that is to say, those concentrated in a perpendicular light cone the angle of which at the top would be  $= 97^\circ$ . The use of "milk" glass eliminates this effect and the photoelements take in the radiation of the entire half-sphere. In the second place, the placing of the



M.V.Kozlianinov.

of light philters under milk glass secures the uniformity of the course of rays of light in their passing through the philter independently of the distribution of the angles of energy in the flowing shaft of light. Without milk glass the rays falling under greater angle to the vertical would be passing a longer way to reach the philter and, therefore, would be weakened more than rays that fall more vertically.

Fig. 2 Photoelectric photometer for measuring underwater lighting /  
XXXXXXXXXX

Fig. 2 - 57

In the apparatus are used selenium photoelements with a ~~xxx~~ sealing layer, with the photosensitivity ( sensitivity to light ) area of 20 centimeters. The integral sensitivity of each of the photoelements has about 300 mka/lumen.

The registering part of the apparatus ~~xx~~ is a potentiometer E - 09 of Russian production - it has given a good account of itself in operations in the sea.

The apparatus is lowered into the sea by cables of 6x1,5 which have, besides current-carrying cores, a steel strand ( center, mandrel? ). The apparatus is always lowered from the ship's board lighted by the sun. The depth limit of immersion is 150 meters. In order to make possible measurements in wide spaces of ~~lighting~~ lighted planes from tens of thousands of lux in the superficial surfaces of the sea up to slightly lighted planes in depths of 120 - 150 meters, the potentiometer is equipped with a system of shunts

M.V.Kozlianinov.

dividing the range ( band ) of measurement in five parts.

The measurements of underwater lighting are conducted with a deviation of not more than 10% of the area under measurement.

Home produced ( 4 ) glass philters for light are used in this device: - blue CC - 4 ( effective length of wave  $\lambda = 400 \text{ m}$  ), green 3C-I (  $\lambda = 520 \text{ m}$  ) and red (  $\lambda = 604 \text{ m}$  ).

The electric power for the apparatus is supplied by the <sup>ship's/</sup>direct current of 110 or 220 volt.

For simultaneous measurements of lighting of ~~the~~ sea surface an objective luxometer U - I6 ( Russian transcription U - I6 ) was used, made by "Vibrator", a Leningrad Factory. Because of the fact that this device is graded for comparatively small lighting phenomena, the use of weakening neuter philters ( HC-6, HC-7, HC-8, HC-9, and HC-10 ) becomes necessary. These philters guarantee the possibility of making measurements under any natural lighting up to the maximum magnitude of ( 130000 lux ). As the glass philters have a mirroring surface, in measurements they are placed between the receiver of the objective luxometer ( sometimes a selenium photoelement is used ) and the milk glass. For measuring the lighting of sea surface in different parts of the spectrum the objective luxometer is equipped with a set of light philters of the same make as the photoelectric photometer. During measurements the light philters are always placed between the photoelement and the milk glass.

Picture 3. Diagram of a measurer of small lightings.

M.V.Kozlianinov.

Using

~~From~~ equations ( 24 ), (25) and ( 26 ), from data obtained by measurements

one can calculate ~~the~~ and obtain the indicators of vertical weakening for different layers of the sea and the coefficients of underwater lighting and diffused reflection of the sea.

the voltmeter of the lamp.

light

Picture 4. Electric diagram of the measurer of small lighting.

In order to make it possible to measure very small lightings at great depths the Oceanographic Institute of the Academy of Sciences had conceived and constructed an objective submersible photometer in which the receiver of the flow of light is a photoelectronic multiplier of the type ~~CP 34~~ - I7 or ~~CP 34~~ - I9. The device is calculated to work up to depths/400-500 meters. Its principle is represented in the diagram of Picture 3. The flow of radiation under measurement is received by the kated of photomultiplier (1), consisting of a layer of antimonial cesium covering the inner surface of the retort of the multiplier. ~~The unit of the feeder of the multiplier consists of the kenotron (2), the transformer (3) and the condenser (4).~~ The unit of the feeder of the multiplier consists of the kenotron (2), the transformer<sup>er</sup> (3) and the condenser (4). An alternate electric current of 1000 volt for ~~CP 34~~ - I7 and of 1200 volt for ~~CP 34~~ - I9 is then directed on the multiplier. The signal of the photomultiplier proportionate to the intensity of falling radiation is transmitted by cable to the measuring device - a bulb voltmeter. The picture 4 shows the electric diagram of the device.

M.V.KOzlianinov.

b/ Measurements of the indicator of weakening ( transparency )  
of sea water.

The measurements are made by a photoelectrical photometer - transparency meter ~~QPM~~ -57. The device, the optical diagram of which is shown on Picture 5, presents a differential-zero photometer destined to measure the indicator of weakening of light in the sea ~~xx~~ by white light as well as in the five parts of the spectrum that can be seen.

Picture 5. The optical diagram of a photoelectrical photo - transparency meter ~~QPM~~ - 57.

/ - light bulb. 2 - supporting photoelement, 3 - measuring photoelement, 4 & 12 - condensers, 5 - light philters, 6, 14 & 15 - diafragms, 7, 8 & 9 - systems of lenses, 10 - protective glass, 11 - heat isolating plate, 13 - mirror.

The device consists of an underwater part and of a registering unit placed on board ship.

In the immersible part of the device is placed a source of artificial light, ~~xxxbulb~~ an incandescent bulb ~~CL~~ - 6I is used for that. After passing through a rotating disc-modulator and the layer of sea water under observation the shaft of light falls on the photoelement. The other part of the shaft is directed upon the supporting photoelement, the signal of which is equalized by means of an electric weakener with the signal of the photoelement ~~lighted~~ by light passing through sea water. The receivers 2 & 3 are ~~are~~ antimonial-cesium

M.V Kozlianinov.

photoelements (1-3), chosen according to their nearest photometric characteristics.

The device works on the principle of the tracking system. The shafts of light modulated by a revolving disk, are transformed by photoelements into an alternate current proportionate to the falling shafts ( flows ) of light. The alternate voltage from the measuring and sustaining photoelements in the "counter-phase" (?) are directed upon kated repeaters from where they move to a booster-converter~~in the~~. In the mixer of the booster-converter the ~~in~~ tensions of the measuring and supporting photoelements are summarized by vector, and the resulting intensity of the signal ( unbalance ? ) goes to the synchronizing detector. Besides, upon the same synchronizing detector goes the sustaining intensity (tension?). Upon the emergence from the synchronizing detector a direct current is created the polarity of which depends on the symbol of the "unbalance" in the mixer, and the "magnitude" is proportionate to the amplitude of the <sup>unbalance.</sup> ~~unbalance~~.

The signal of the direct current from the synchronizing detector goes to the booster of the registering part.

The device is able to make measurements of the indicator of weakening of light in the sea at depths from 0 to 150 meters in waters of different degrees of muddiness - from very clear waters of open ocean ranges (  $\tau = 0,05$  ) to coastal turbid waters (  $\tau = 2,00$  ). The registration of the indicator of weakening is made with a relative deviation of no more than 1%.

A potentiometer ~~30~~ -09 is used as a registration device with a few changes in its construction which allow ~~the~~ to perform the registration of symbols of indicators of weakening in a wide <sup>variation</sup> ~~range~~ of water muddiness with about the same precision.

- 33 -

M.V.Kozlianinov

For measurement of transparencies of water in great depths the is equipped with a removable container located between the lighting appliance and the photoelement. In this case the apparatus is on board ship, and the container is filled with water from bathometers. The capacity of the container is of 500 cubic centimeters and it permits the performance of mass measurements with standard hydrological series.

The underwater and the registering parts of the device are connected by a cable of trademark 6x1,5.

The electric feeding of the apparatus is made by the ship network of current of 220 volt. In order to allow uninterrupted registering of water transparencies in the upper layers of the surface of the sea while the ship is in motion the Institute of Oceanography has built a transparency-measurer which is towed by the ship. (Picture 6)

Picture 6. The towed transparency meter. (or measurer.)

This device consists of an objective photometer in which the ray of light coming from bulb (1), after passing through a layer of water 1 meter wide (thick) is received by photoresisting - I (3). The bulb and the photo-resistor are covered by protective glass covers (2). The underwater part of the device is connected with <sup>the</sup> registering device or: core sampling by/carotage cable (4), trademark -03, which has, besides current conducting/copper cores, conducting steel core. For this purpose the potentiometer -09 may also be used. The cuts (5) in the diagram of the body of the device are constructed in such a way as to facilitate the free access of water into the device and at the same time not to let 1

M.V.Kozlianinov.

natural light on the photoelement while working with apparatus in daylight.

c/ Measurements of the coefficient of brightness of the sea.

The measurements are made with the hydrophotometer UPT -19. Its optical diagram is shown in Pic. 7. The apparatus is a visual photometer based on the equalizing of brightnesses of two fields, one of which is made by light ~~shining~~<sup>coming</sup> out of the sea, and the other - created by the natural light of the sky and the sun falling upon a horizontal plate of dulled milk glass. The device is equipped with a pipe the bottom end of which is immersed into the sea. The light coming out of the density of the sea goes through the lenses of the reversing system and enters a photometric prism that serves to equalize the brightnesses of both fields. The equalization is achieved by moving the milk glass with the help of a system of levers. The readings are made through an ocular (eye piece) on a sector scale lighted by an "illuminator" (opening). In order to <sup>make</sup> measurements in different parts of the spectrum the device is equipped with a revolving diafragm with replaceable philters. In that way it is possible to make measurements not only in a white light, but also in the following perceptible parts of the spectrum: blue ( $\lambda_{sp} = 459 m\mu$ ), blue-green ( $\lambda_{sp} = 494 m\mu$ ), green ( $\lambda_{sp} = 528 m\mu$ ), green-yellow ( $\lambda_{sp} = 556 m\mu$ ), orange ( $\lambda_{sp} = 587$ ) and red ( $\lambda_{sp} = 600 m\mu$ ). The readings on the scale of the apparatus are translated into coefficients of brightness of the sea with the application of calibration data of the device.

Picture 7. The optical diagram of the hydrophoto meter UPT - 19



Picture 7 (cont.) Description: 1/ a dulled milk glass plate. 2/ a moving milk glass. 3 & 5/- lenses; 4/ photometrical prism; 6/ - ocular; 7/ - changeable (removable) light filters; 8/ divided scale; 9/ directing prism; 10/ - transforming system's lens; 11/ - diaphragm; 12/ - illuminator; 13/ - lever system; 14/ - flange.

Picture 8: Description  
A device for measuring the indicatress of brightness of the sea.

The relative error in determining the coefficient of brightness of the sea is 5 to 15%, depending on the value of the amount measured.

For measuring the coefficients of brightness of radiation coming from the layer of the sea not only vertically, but under different angles in regard to the vertical, and in different azimuths in regard to the sun, the apparatus is equipped with a special device (that replaces (Picture 8) the lower bend of the pipe in the apparatus. The device consists of a flat mirror (1), placed under the ~~entrance~~ illuminator (opening) of the pipe of the apparatus and of a mechanism ~~of~~ for its turning and pumping. To make measurements in different azimuths the mirror is turned by a wheel (2) which moves this mirror by means of a feed shaft (3). The wheel is equipped with a dial that shows the azimuth, in which the measurements are made. The necessary



M.V.Kozlianinov.

The necessary incline of the mirror is achieved by means of a handle (4). The locator (5) fixes the mirror in three positions allowing to measure the coefficient of brightness of radiation coming from deep layers of the sea to the surface under angles towards the vertical of 30, 60, and 90°.

The measurements are performed when the ship is on anchor or drifting from board ship lighted by the sun. The apparatus is fastened to board ship with special supporting plates. In case of a very high board ship when the maximum length of the apparatus ( 3,5 meter ) is insufficient, the apparatus is fastened to a special platform overboard ship as it was done on S.S. "Vityaz". Such a system of fastening is represented on Picture 9 .

Picture 9. The fastening of the hydro-photometer UPT - 19 on a high board ship.

## 2/ Laboratory measurements of optical characteristics of sea water.

The measurements are performed with the help of the spectrohydro-nephelometer - transparency meter UPT - 25. The device, represented on

<p><u>Picture 10</u> General aspect of spectrohydro-nephelometer- transparency meter -25.</p>	<p>allows to determine in a white light and on six different segments of the spectrum the coefficients of penetration of sea water and <del>ix</del> its indicators for of brightness and different angles of diffusion. <u>According to/</u> <u>These data are determined the basic optical</u></p>
---	--

I/ After the printing of this article another improved spectrohydro-nephelometer was devised and built -57 based on the existing - 25.

M.V.Kozlianinov.

characteristics of the water - the indicators of diffusion and weakening as well as the indicatress of diffusion. These characteristics, in turn, allow to determine the value (amount?) of the indicator of absorption and to evaluate the amount of absorption and diffusion in of general weakness of a directed flow (shaft) in sea water. The measurements can be performed in polarized as well as in unpolarized light.

The device is a visual photometer in which the brightness of light passed through or diffused by water is compared with the brightness of a plate of milk glass measured before. The optical diagram of the device is reproduced on Picture II.

The container of the device is filled with water pumped by a pump, or taken by bathometers. The lighting of the device is effectuated by an electric bulb, a condenser, diaphragms and a lens. The lighting apparatus is fastened to the limb of the wheel (turnstile?) which turns on its axis and is covering the container.

Picture II (see page 26 of the original) Description:

1/ container of the device. 2 lens of the lighting apparatus. 3/ - diaphragms. 4 - condenser; 5 & 15 - electric bulbs; 6 - directing axis of the container; 7/ - lens of the photometer; 8/ - photometric prism; 9 - ocular; 10/ - light philters; 11 - movable "pupils" of exit; 12, 13 & 14/ - milk glass of the photometer; 16/ - the roller for readings; 17/ - an extra weakener; 18/ - replaceable diaphragms, 19 - graded calibration plate; 20/ graded neutral philters; 21/ - fillers, 22/ milk glass of the lighter; 23/ fitted - analyzer; 24/ - fitted - polarizer; 25/ - spheric mirror; 26/ - accumulators; 27/ - reostat; 28/ - amperometer; 29/ - voltmeter; 30/ - switch.

In order to measure the indicator of weakening the lighting device is placed in the extreme backward position, and its light, passing through the layer of water in the apparatus, is reflected from the spherical mirror, then it reaches the lens of the photometer in the

M.V.Kozlianinov.

focal plane (surface) of which is placed a device to create fields of comparison. The measurements of the brightness of light ~~diffused~~ <sup>are</sup> at different angles, ~~is~~ made by turning the lighting device to a certain angle. In this case the lens of the photometer is lighted by a light, diffused by a layer of water lying in the shaft of parallel rays coming from the lighting device.

The comparing part of the photometer consists of a turning lighting device which includes a bulb and milk glass, an unmovable milk glass and <sup>a/</sup> photometric prism.

The degrees of brightness of diffused light and of light passing through the water are compared with the brightness of the unmovable milk ~~gr~~ glass. Thus, one of the fields (planes?) of comparison is lighted by light passing through water, and the other - by light in the ~~y~~ comparing part of the photometer. On the equalization of both these fields the measurements are based.

The measuring device is mounted on the body of the photometer fashioned in the form of a cup which represents the container of the device. On the same body the lens of the photometer, the ocular and the light filters are fastened. When measurements are made the lighting device of the photometer is moved by a screw propeller put into motion by a roller. By turning the roller in different directions an equalization of the brightness of photometrical fields is achieved, and the readings are made from the tracings on the graded roller.

/in hundreds of thousands and even in million times  
The brightness of light diffused in sea water may change/  
depending on the content of the suspension (?) matter and the difference in angles of diffusion. In order to be able to measure brightness in such wide variations different removable diaphragms are placed

in the measuring part of the photometer, and in the comparing part - an extra lighting device. The existence of removable ~~diaphragms~~ <sup>diaphragms</sup> requires the placement of two "pupils" (?) in the exits - a round one and a segmentary one.

To conduct measurements in polarized light a "cap" - polarizer is placed in front of the lens, of the lighting device, and in front of the exit "pupil" a "cap" - analyzer is placed.

The bulb of the lighting device is plugged together in succession to the bulb of the photometer. This creates the identical environment for their action independent of possible fluctuations in <sup>voltage</sup> tension of the source of feeding. The <sup>voltage</sup> tension and power of the current going to the bulbs in the apparatus are controlled by a voltmeter and an amperometer. The feeding of the apparatus is done by direct current with <sup>voltage</sup> tension of 16 volts.

For conducting measurements in different parts of the ~~ax~~ spectrum the apparatus is equipped with a series of light filters composed of 6 models: - blue (  $\lambda = 475 \text{ m}$  ); green - (  $\lambda = 520 \text{ m}$  ); yellow-green (  $\lambda = 544 \text{ m}$  ); orange (  $\lambda = 568 \text{ m}$  ); and two red - (  $\lambda = 604 \text{ m}$  ); and (  $\lambda = 648 \text{ m}$  ).

The water-intaking part of the device consists of a pump and hoses to lift the water and to pour it off. The centrifugal pump is activated by an electro-motor ~~no~~ - 80 which works with alternate or direct current of 110 and 220 voltage. The pump can lift the water 3 - 4 meters above the water line of the ship.

The general volume of water in the apparatus is 3 l(?). This fact makes the study of optical characteristics of deep layers of water rather difficult, when pumping of water is impossible due to insufficient ~~length~~ length of the cable, and samples are taken by bathometers.

M.V.Kozlianinov

Readings taken from the roller of the device by means of graded graphs are translated into coefficients of filtration and indicators of brightness of water. Then, using equations (7), (16), (19) and (20), the indicators of weakening and diffusion of light in water are calculated and the indicatress of diffusion is constructed (found?).

deviation  
The error in determining the indicator of weakening fluctuates between 3 - 5% for muddy waters to ~~12-15~~ 12 - 15% for pure waters of deviation open ocean regions. The relative error in determining the indicator of diffusion averages about 15%.

#### 4. Some interrelations between hydrooptical characteristics.

According to Ambartsumian's equation (43)

$$I = \frac{B(\theta) e^{-kz}}{1 + k \cos \theta}$$

the intensity of diffused radiation changes with depth according to the exponential law, and the indicator of weakening in this case differs from the indicator of directed radiation  $\epsilon$ . Then, marking as before, the indicator of weakening of diffused flow by  $q$ , we have:

$$q = k\epsilon. \quad (52)$$

We have mentioned above that parameter  $K$  may be deducted from the equation (44) if the indicatress of diffusion and the correlation between diffusion and general weakening <sup>is</sup> ~~are~~ known. Taking into consideration that this parameter plays an important part in many practical calculations, let's study the possibility of a simple and quick definition of this "magnitude" (unit) by using other optical characteristics.

Let's substitute in the equation (24), which gives the definition of <sup>of</sup> (or: determines) the indicator of vertical weakening  $\alpha$ , the values  $S_{z_1}$  and  $S_{z_2}$ , obtained for depths  $z_1$  and  $z_2$  from the first equation

M.V.Kozlianinov

of the system ( 48 ). Replacing the indicator  $q$  by an equal to it indicator  $q$  ( 51 ), and marking.....

$$IO - ( \dots ) = A, \quad \text{and} \quad IO - ( \dots ) = B,$$

we find:

( 53 )

It follows from this formula that the indicator of vertical weakening is not a constant "magnitude", but with the increase of depths - (  $z$  and  $z$  ) and with the increase of the thickness of the layer (  $z$  ) it approaches its limiting value  $q$ . The indicator becomes exactly equal to the indicator of weakening of diffused radiation  $q$  under conditions of lighting of the surface of the sea by diffused light only or in sufficiently great depths where direct solar radiation does not penetrate (  $\dots = 0$  ). Then instead of ( 52 ), we have:

( 54 )

In this way, according to data of simultaneously made measurements of sea water transparency ( indicator ) and underwater lighting ( indicator ), it is easy to calculate the coefficient  $k$ , which shows how many times the weakening of directed flow exceeds the weakening of diffused radiation.

In ~~xxxx~~ the equation ( 54 ) one may clearly see the difference between the indicators of general weakening and the vertical weakening. The results of numerous measurements show that for open regions in the ocean the mean "magnitude" of coefficient  $k$  consists of 0,20 - 0,25. Physically the difference between these "magnitudes" is quite understandable, because indicator represents the sum of indicators of absorption and diffusion, and indicator is composed of the indicator of

M. V. Kozlianinov.

absorption and of a part of the indicator of diffusion only, because, owing to the lengthening of the indicatress of diffusion forward <sup>falling</sup> in the direction of ~~directed~~ rays, the light diffused in the sea is not lost for the lighting of lower layers.

Let's return to the equation ( 46 ) of Hambur/tzeff. After a series of simple modifications it appears thus:

( 55 )

The resulting equation shows that the diffused reflection of the sea depends only of the correlation between the diffusion backwards and absorption and does not materially change with depth. This important deduction is wholly corroborated by numerous experimental data.

Let's note that the radical which stands in the right part of Hamburtzeff's/ ~~the~~ equation ( 46 ) according to equation ( 51 ) represents the indicator of weakening of diffused radiation  $g$ . Then, instead of ( 46 ) we have :

( 56 )

Solving the equation in reference to  $g$  and substituting its value in ( 56 ), we have :

( 57 )

From here, assuming that in conformity with ( 53)  $g = \dots$ , we find an equation that determines ( or defines ) the indicator of absorption of diffused radiation  $a$  by means of the indicator of vertical weakening  $\alpha$  and of the coefficient of diffused reflection of the sea :

( 58 )

The latter equation is interesting because the direct experimental definition of the indicator of absorption represents great difficulties.

Taking into consideration that diffused reflection of the sea in



M.V.Kozlianinov

in open spaces is very small ( generally is not over 0,02 - 0,03 ), it follows from ( 58 ) that the weakening of the diffused flow in the sea can be defined ( determined ) almost completely by the real absorption. In this process the diffusion backwards undoubtedly plays a definite part. As stated above ( 5I )

( 59 )

it results, with a deviation not over 0,01, as magnitude is very small, that

$$= a + \dots$$

Using correlations (30) and (58) it is easy to find the indicator of diffused radiation b :

( 60 )

and its components ( 3I ) - indicators of diffusion forward and backwards. Solving the transposed Hamburtzeff's equation ( 56 ) in relation to and substituting the value a from ( 58 ) we have;

( 6I ).

The indicator of <sup>ed</sup>diffused radiation forward is very near zero. In fact, as  $= a + b$  (30), and in its turn  $b = \dots + \dots$  ( 3I ), then  $= a + \dots + \dots$ . We saw before that  $= a + \dots$ . In this way, in the first approximation, as it follows from equation (60), the weakening of diffusing of the flow spreading in the sea is determined only by diffusion backwards and the real absorption.

The equations obtained thus allow to calculate the amount of a whole series of optical characteristics by the use of easily determined from measurements "magnitudes" of indicators of vertical weakening and the coefficient of diffused reflection of the sea. Using data of simultaneous measurements of weakening of the flow of natural light and elements of weakening of directed flow ( of transparency of sea water and its indicatresses of diffusion ) it is possible to



M.V.Kozlianinov.

to obtain all  $\alpha$  "magnitudes" necessary for calculating characteristics of the lighting regimen of the sea. The same calculations may be used ~~with~~ successfully for determining the characteristics of flows of radiation going into the sea from the ~~direction~~ ~~of~~ ~~the~~ rays of the projector and vice versa. Such computations are interesting when applied to the solution of problems connected with lighting during emergency-salvage work, during solution of problems connected with the defining of visibility of underwater objects, ~~reasonably~~ security of work of underwater television sets, determining the optimum conditions for airphotography over the sea, etc...

#### Literature

- Ambartzumian, V.A. . Problems of diffused reflection of light in muddy water. DAN ( Documents of the Academy of Science (?) 1943, vol.37; N°8.
- Ambartzumian, V.A. . New method of computation of diffusing of light in a muddy medium. Report of the Academy of Sciences USSR . Geography & geophysics series. 1944, N° 3.
- Hamburtzeff, A.G. . The problem of coloring of the sea. M. 1924.
- Gershon, A.A. . [Selected works on photometry & phototechnique. M. 1958
- Ceha, I.A. . Units of measurement/ of physical units. Governement technical publications 1948.
- Joseph, J. . of measurements/ Studies/ of lighting above and below in the sea and their correlation with measurements of transp- arence. German Hydrographic Journal B.3. 1950.

М. В. Козлянинов

### ГИДРООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДИКА ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под гидрооптическими характеристиками понимаются физико-химические и биологические характеристики вод океанов, морей, озер и других водных бассейнов, определяющие условия распространения в них света. При этом под понятием «свет» подразумевается электромагнитное излучение, сосредоточенное в так называемом оптическом участке спектра, т. е. излучение, заключенное в интервале длин волн от  $\lambda = 0,01$  до  $\lambda = 3,40$  м. Оптический участок спектра, следовательно, значительно шире его видимой части, лежащей в пределах от  $\lambda = 0,4$  до  $\lambda = 0,8$  м. Таким образом, гидрооптические характеристики определяют условия распространения в воде как видимых лучей, так и невидимого человеческим глазом излучения, принадлежащего к ультрафиолетовой и инфракрасной частям спектра. Необходимость исследования условий распространения этих лучей объясняется тем, что при решении различного рода задач приходится встречаться с воздействием поля излучения не только на человеческий глаз, но и на разнообразные растительные и животные организмы, фотопластики, фотоэлементы, пиранометры и др. Кроме того, как известно, инфракрасное излучение играет весьма существенную роль в теплообмене между океаном и атмосферой.

В гидрофотометрии до сих пор отсутствует строгое разграничение понятий и не выработано достаточно четкой и ясной терминологии. Одни и те же величины часто называются по-разному и, наоборот, под одними и теми же терминами иногда понимаются разные физические величины. Это касается как нашей отечественной, так и иностранной и, особенно, зарубежной литературы. В результате разные авторы не всегда понимают один другого, поэтому часто возникают ошибки, а иногда и заблуждения.

Прежде всего, приведем определения основных гидрооптических характеристик с указанием их размерности и единиц, в которых они измеряются. Там, где только это возможно, определения и обозначения основываются на разработанном в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова Государственном стандарте (ГОСТ 7604-55. Физическая оптика. Обозначения основных величин), введенном в действие в 1956 г.

Можно надеяться, что помещение такого перечня (насколько известно, до сих пор его в литературе не приводилось) послужит делу унификации и стандартизации в области гидрофотометрии и тем самым поможет устранить отмеченные выше неопределенность понятий и нечеткость терминологии.

Теоретические основы гидрооптики, красугольным камнем которых является проблема рассеяния излучения в мутных средах, разработаны

весьма глубоко. Труды Хвольсона, Ми, Гершуна, Гамбургца, Шулейкина, Фока, Иозофа и особенно последние работы Амбарцумяна и возглавляемой им школы советских астрофизиков весьма полно раскрывают очень сложные закономерности оптических процессов, протекающих в водах различных бассейнов. Далеко не так обстоит дело с методикой и техникой гидрофотометрических измерений и, как следствие этого, с нашими сведениями о гидрооптических характеристиках водных масс океанов и различных морей. Отсутствие стандартной измерительной аппаратуры и недостаточная разработка методики наблюдений с имеющимися уникальными и опытными образцами приборов приводят к тому, что эти наблюдения часто ведутся грубо и примитивно с заметным отставанием техники измерений от современных возможностей.

При развертывании работ в области гидрооптики в Институте океанологии АН СССР было учтено, что первоочередной задачей в этом направлении является совершенствование существующих и разработка новых методов гидрофотометрических исследований. Естественно, что первым шагом на этом пути должно было быть создание стандартной измерительной аппаратуры, основанной на использовании современных технических средств, в частности, средств электронной и полупроводниковой техники.

Основываясь на данных испытаний и эксплуатации опытных образцов приборов, сконструированных в течение последних лет в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова (ГОИ), Институтом океанологии АН СССР (ИОАН) совместно с ГОИ и др., были разработаны технические условия для проектирования и изготовления комплекта стандартной гидрооптической аппаратуры, состоящего из четырех приборов и размещен заказ на их изготовление. Кроме того, для обеспечения возможности выполнения наблюдений на ходу судна и для специальных измерений очень малых освещенностей на больших глубинах в ИОАНе были разработаны и изготовлены опытные образцы еще двух гидрооптических приборов. В этой статье после перечня гидрооптических характеристик и изложения некоторых основных теоретических предпосылок, необходимых для обоснования тех или иных методов измерений, и для исследования зависимостей между различными оптическими характеристиками, приводится краткое описание новой гидрооптической аппаратуры и рассматриваются основные вопросы методики современных гидрофотометрических измерений. Изложение методических вопросов основывается как на литературных данных, так и в значительной мере на разработках, выполненных во время экспедиционных и экспериментальных работ на э/с «Витязь» и на Черноморской экспериментальной научно-исследовательской станции Института.

Статья заканчивается исследованием зависимостей между различными гидрооптическими характеристиками, рассмотрение которых приобретает вполне определенный интерес в связи с тем, что непосредственное измерение ряда этих характеристик весьма трудоемко и требует применения специальной аппаратуры. Основываясь на таких зависимостях, полученных теоретически или найденных экспериментально, при работах в море можно ограничиться минимальным числом измерений. Вполне понятно, что знание этих зависимостей также совершенно необходимо для получения правильных представлений об оптических процессах, протекающих в море. Эмпирические связи между глубиной видимости белого стандартного диска и некоторыми основными оптическими характеристиками здесь не затрагиваются, так как будут рассмотрены в специальной работе, посвященной

### 1. ОСНОВНЫЕ ГИДРООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Прежде чем приступить к определениям гидрооптических характеристик, отметим, что в гидрофотометрии значительно удобнее пользоваться не светотехническими, а энергетическими величинами (Сена, 1949), т. е. оперировать не понятиями «световой поток», «яркость», «освещенность» и т. д., а понятиями «лучистый поток», «энергетическая яркость», «энергетическая освещенность» и т. д. Выше уже упоминалось, что в гидрооптике исследуется не только видимое, но и ультрафиолетовое и инфракрасное излучения и при решении ряда задач можно встретиться с действием поля излучения на самые различные приемники радиации, кривые спектральной чувствительности которых могут весьма существенно отличаться от кривой спектральной чувствительности человеческого глаза. Энергетические величины, как известно, совершенно свободны от каких бы то ни было физиологических особенностей зрения, в то время как светотехнические зависят от них. В случае необходимости переход от энергетических величин к светотехническим осуществляется весьма просто. Для этого необходимо только знать так называемую относительную видимость  $v$  интересующего нас приемника излучения, т. е. вид функции  $v = f(\lambda)$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения. В дальнейшем под терминами поток, яркость, сила света, освещенность и т. д. всюду понимаются энергетические величины.

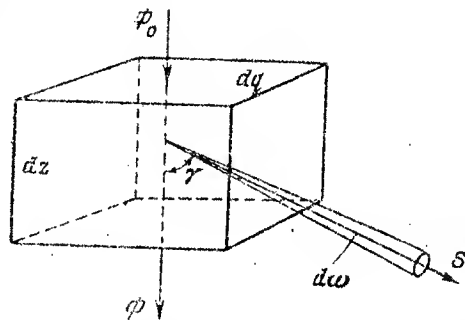


Рис. 1. Схема определения показателей поглощения, рассеяния и ослабления света в морской воде

Выделим в море бесконечно малый объем  $dv = dq \cdot dz$  (рис. 1). Пусть на верхнюю грань  $dq$  этого объема отвесно падает поток монохроматических лучей, расхождением которых в пределах элементарного объема можно пренебречь. Обозначим поток излучения, падающий на грань, через  $\Phi_0$ , а создаваемую им освещенность через  $E$ .

При прохождении потока  $\Phi_0$  через объем  $dv$  часть его  $d\Phi_{0\lambda}$  будет поглощена, а часть —  $d\Phi_{0\lambda}$  — рассеяна. Количество поглощенной и рассеянной морской водой энергии излучения определяется соответственно значениями ее показателей поглощения и рассеяния, которые принадлежат к числу наиболее важных гидрооптических характеристик.

Показателем поглощения морской воды называется величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения в 10 раз. Показатель поглощения также может быть определен как величина, равная отношению потока излучения, образующего параллельный пучок и поглощенного единичным объемом морской воды, к освещенности, создаваемой этим потоком на перпендикулярной к нему плоскости:

$$x = -M \frac{d\Phi_{0\lambda}}{\Phi_0 dz} = -M \frac{d\Phi_{0\lambda}}{E dv}, \quad (1)$$

где  $M = 0,4343 \dots$  — модуль десятичных логарифмов.

Показателем рассеяния морской воды называется величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения,

образующего параллельный пучок, ослабляется в результате рассеяния в 10 раз. Показатель рассеяния также может быть определен как величина, равная отношению потока излучения, образующего параллельный пучок, и рассеянного единичным объемом морской воды, к освещенности, создаваемой этим потоком на перпендикулярной к нему плоскости:

$$\sigma = - M \frac{d\Phi_0 \sigma}{\Phi_0 dz} = - M \frac{d\Phi_0 \sigma}{E dv}. \quad (2)$$

Из определений следует, что размерность показателей поглощения и рассеяния обратна размерности длины, т. е.  $[\kappa] = [L^{-1}]$  и  $[\sigma] = [L^{-1}]$ . В гидрооптике эти показатели обычно измеряются в обратных метрах.

В результате совокупного действия процессов поглощения и рассеяния поток излучения  $\Phi_0$ , вошедший в объем  $dv$ , испытывает общее ослабление, т. е. часть его —  $d\Phi_0 \epsilon = d\Phi_0 \kappa + d\Phi_0 \sigma$  — не пойдет в первоначальном направлении. Суммарное количество поглощенной и рассеянной в воде энергии излучения определяется значением показателя ослабления, который также является одной из важнейших оптических характеристик морской воды.

Показателем ослабления  $\epsilon$  морской воды называется величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате совместного действия поглощения и рассеяния в 10 раз. Показатель ослабления также может быть определен как величина, равная отношению потока излучения, образующего параллельный пучок и ослабленного в результате поглощения и рассеяния единичным объемом морской воды, к освещенности, создаваемой этим объемом на перпендикулярной к нему плоскости:

$$\epsilon = - M \frac{d\Phi_0 \epsilon}{\Phi_0 dz} = - M \frac{d\Phi_0 \epsilon}{E dv}. \quad (3)$$

Очевидно, что

$$\epsilon = \kappa + \sigma. \quad (4)$$

Размерность показателя ослабления такова же, как и размерность показателей поглощения и рассеяния, т. е.  $[\epsilon] = [L^{-1}]$ . Как и показатели  $\kappa$  и  $\sigma$ , показатель  $\epsilon$  измеряется в обратных метрах.

В отечественной, а также и в иностранной литературе часто пользуются показателями поглощения, рассеяния и ослабления, определяемыми по ослаблению света не в 10, а в  $e$  раз (где  $e$  — основание натуральных логарифмов). В этом случае эти величины называются натуральными показателями поглощения  $\kappa'$ , рассеяния  $\sigma'$  и ослабления  $\epsilon'$ . Очевидно, что

$$\kappa = M\kappa', \quad \sigma = M\sigma' \quad \text{и} \quad \epsilon = M\epsilon'. \quad (5)$$

Согласно уравнению переноса излучения, поток монохроматических лучей, прошедший в однородной воде без изменения направления некоторый путь  $dz$  (рис. 1), определяется из соотношения:

$$-\epsilon' \Phi = \frac{d\Phi}{dz}.$$

Интегрирование этого уравнения дает хорошо известный показательный закон ослабления Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon' z}. \quad (6)$$

Равенство (6) позволяет определить еще две весьма важные оптические характеристики воды — прозрачность и коэффициент пропускания. Последний, в свою очередь, однозначно определяет оптическую плотность.

Коэффициентом пропускания  $T$  морской воды называется отношение потока излучения, прошедшего некоторым слоем воды, к потоку излучения, упавшему на этот слой:

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\epsilon'z} = 10^{-\epsilon z}. \quad (7)$$

Величина  $\epsilon'z$  называется оптической глубиной  $\tau$ .

Из равенств (7) очевидно, что коэффициент пропускания  $T$  является величиной безразмерной.

Десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания, называется оптической плотностью  $D$ :

$$D = \lg \frac{1}{T}. \quad (8)$$

Прозрачностью  $\theta$  морской воды называется отношение потока излучения, прошедшего в ней без изменения направления путь, равный единице к потоку излучения, вошедшему в воду в виде параллельного пучка. Иначе говоря, прозрачностью морской воды называется ее коэффициент пропускания для однородного слоя единичной толщины. Из равенств (7) следует, что

$$\theta = e^{-\epsilon'} = 10^{-\epsilon}. \quad (9)$$

Прозрачность  $\theta$  — величина безразмерная.

Для значений величин  $T$  и  $\theta$  всегда соблюдается условие:

$$\theta \leq T \leq 1 \text{ и } 0 \leq \theta \leq 1.$$

Из формулы (9) следует, что показатель ослабления численно равен абсолютному значению десятичного логарифма прозрачности:

$$\epsilon = |\lg \theta|. \quad (10)$$

Таким образом, величины  $\epsilon$  и  $\theta$  однозначно определяют друг друга.

Если элементарный объем воды  $dv$  (см. рис. 1), освещаемый потоком излучения  $\Phi_0$ , рассматривать с некоторого расстояния в направлении  $S$ , составляющем угол  $\gamma$  с направлением падающих лучей, то, вследствие явления рассеяния, этот объем будет светиться как источник излучения, имеющий в этом направлении энергетическую силу света:

$$dI = \frac{1}{4\pi} \sigma(\gamma) E dv = \beta' \frac{E}{\pi} dv. \quad (11)$$

где  $\sigma'(\gamma)$  — натуральный показатель рассеяния в данном направлении (Гершун, 1958). Через  $\beta'$  в этом равенстве обозначен натуральный показатель яркости морской воды, а через  $E$  — по-прежнему освещенность верхней грани объема. Как известно, яркость  $B_0$  идеально белой поверхности<sup>1</sup>, перпендикулярной направлению освещения, определяется как

$$B_0 = \frac{E}{\pi}.$$

<sup>1</sup> Здесь и в дальнейшем под идеально белой матовой поверхностью понимается диффузно отражающая, непрозрачная и не поглощающая поверхность.

Подставляя выражение для  $B_0$  в (11), получаем равенство, дающее возможность определить еще одну важную гидрооптическую характеристику — показатель яркости воды.

Показателем яркости  $\beta'$  морской воды называется отношение силы света, рассеянного в данном направлении единицей объемом воды, к яркости идеально белой матовой поверхности, перпендикулярной направлению лучей, освещающих рассматриваемый объем:

$$\beta' = \frac{dI}{B_0 dv}. \quad (12)$$

Из этого равенства следует, что размерность показателя яркости обратна размерности длины  $[\beta'] = [L^{-1}]$ . Показатель яркости обычно измеряется в обратных метрах.

Если из центра рассеивающего объема отложить векторы, равные по величине показателю яркости  $\beta'$ , то поверхность, огибающая концы этих векторов, будет представлять пространственное распределение энергии рассеянного света вокруг рассматриваемого объема. Такая поверхность носит название индикатрисы показателя яркости  $\beta'(\gamma)$ . Для неполяризованного света эта поверхность симметрична относительно любой плоскости, проходящей через направление падающих лучей. Поэтому индикатрису показателя яркости можно представлять плоской кривой, характеризующей распределение энергии рассеянного света в зависимости от угла рассеяния. Полную характеристику условий рассеяния неполяризованного света в морской воде будут давать спектральные индикатрисы показателя яркости  $\beta'(\gamma, \lambda)$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения.

Общий поток, рассеянный элементарным объемом  $dv$  по всем направлениям, определится как

$$\Phi_0 \sigma = \int_{4\pi} I dw, \quad (13)$$

где  $dw$  — элементарный телесный угол, ось которого составляет угол  $\gamma$  с направлением падающих лучей.

Из уравнений (2) и (13), с учетом (11), следует, что показатель рассеяния  $\sigma$  равен

$$\sigma = \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} \beta(\gamma) dw = \frac{M}{\pi} \int_{4\pi} \beta'(\gamma) dw, \quad (14)$$

где  $M$  — по-прежнему модуль десятичных логарифмов.

Так как

$$\int_{4\pi} dw = 2\pi \int_0^\pi \sin \gamma d\gamma, \quad (15)$$

то вместо (14), получаем окончательно соотношение, которое служит для расчета показателя рассеяния  $\sigma$  по измеренным значениям  $\beta'(\gamma)$ :

$$\sigma = 2M \int_0^\pi \beta'(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (16)$$

Как в теоретических работах, так и при обработке результатов измерений и при производстве различных расчетов часто пользуются не индикатрисой показателя яркости, а индикатрисой рассеяния  $\kappa(\gamma)$ . Если вероятность рассеяния излучения внутри телесного угла  $dw$  обозначить через  $\kappa(\gamma) \frac{dw}{4\pi}$ ,



то имеем очевидное условие:

$$\int_{4\pi} x(\gamma) \frac{dw}{4\pi} = 1,$$

или, принимая во внимание (15):

$$\frac{1}{2} \int_0^{\pi} x(\gamma) \sin \gamma d\gamma = 1. \quad (17)$$

Из равенств (16) и (17) следует, что

$$x(\gamma) = \frac{4M\beta'(\gamma)}{\sigma} = \frac{4\beta(\gamma)}{\sigma}. \quad (18)$$

Если через центр рассеивающего объема провести плоскость, перпендикулярную падающим лучам, то потоки рассеянного излучения, распространяющиеся по обе стороны от этой плоскости, значительно различаются между собой. Только для чисто молекулярного рассеяния, обусловленного флуктуациями плотности, эти потоки одинаковы, что соответствует сферической форме индикатрисы рассеяния (так называемой индикатрисе Релея). Индикатрисы рассеяния даже для очень чистых океанических вод сильно вытянуты вперед, т. е. в направлении падающих лучей и имеют кинжальную форму. Различие в потоках рассеянного излучения, отбрасываемых вперед и назад от только что упомянутой пограничной плоскости (или, иначе говоря, асимметрия индикатрис рассеяния), в значительной мере определяет условия распространения света в море. Поэтому возникает необходимость в получении количественных характеристик, определяющих различие в этих потоках. Такими характеристиками являются показатели рассеяния вперед и назад.

Показателем рассеяния вперед  $\delta$  называется компонент показателя рассеяния, определяющий долю потока рассеянного излучения, распространяющегося в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого совпадает с направлением падающих лучей:

$$\delta = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (19)$$

Показателем рассеяния назад  $\phi$  называется компонент показателя рассеяния, определяющий долю потока рассеянного излучения, распространяющегося в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого противоположна направлению падающих лучей:

$$\phi = 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (20)$$

Очевидно, что показатель рассеяния  $\sigma$  равен сумме этих показателей, т. е.

$$\sigma = \delta + \phi. \quad (21)$$



Часто оказывается существенным знать, какая часть всего рассеянного излучения сосредоточена в конусе, ограниченном углами  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , т. е. какое значение функции

$$f(\gamma) = \frac{\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma}{\int_0^{\pi/2} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma}. \quad (22)$$

Необходимо подчеркнуть, что равенства (3) и (10), послужившие для определения показателя ослабления, а также равенство (6), выражающее закон Бугера, справедливы только для направленного, монохроматического излучения, распространяющегося в однородной среде. В то же время практически очень часто приходится иметь дело с распространением в море дневного света, являющегося не только немонахроматическим (сложным), но и смешанным (направленным и диффузным) излучением. Поэтому в гидрооптику было введено понятие о показателе вертикального ослабления, характеризующем изменение естественного света с глубиной. Многочисленные эксперименты, выполненные в разное время разными авторами, с полным согласием показывают, что в первом приближении дневной свет в море ослабляется с глубиной по показательному закону:

$$S_{z_2} = S_{z_1} 10^{-\alpha z}, \quad (23)$$

где  $S_{z_1}$  — поток немонахроматического смешанного излучения на глубине  $z_1$ ;  $S_{z_2}$  — поток того же излучения на глубине  $z_2$ ;  $z = z_2 - z_1$  — толщина водного слоя.

Показателем вертикального ослабления  $\alpha$  называется величина; обратная расстоянию, на котором поток естественного света ослабляется в результате совместного действия поглощения и рассеяния в 10 раз. Согласно равенству (23) показатель вертикального ослабления может быть также определен как разность логарифмов потоков естественного света на верхней и нижней границах водного слоя, отнесенная к его толщине:

$$\alpha = \frac{\lg S_{z_1} - \lg S_{z_2}}{z} = \frac{1}{z} \lg \frac{S_{z_1}}{S_{z_2}}. \quad (24)$$

Аналогично понятию о натуральном показателе ослабления  $\varepsilon'$  может быть введено понятие и о натуральном показателе вертикального ослабления  $\alpha'$ :

$$\alpha = M\alpha'.$$

Из равенства (24) следует, что размерность показателя вертикального ослабления обратна размерности длины:  $[\alpha] = [L^{-1}]$ . Так же как и показатель  $\varepsilon$ , показатель  $\alpha$  обычно измеряется в обратных метрах.

Изменение с глубиной распространяющегося в море потока дневного света удобно характеризовать коэффициентом подводной освещенности  $\eta$ , под которым понимается отношение освещенности  $E_z$  некоторой плоскости, находящейся в море на глубине  $z$ , к одновременному значению подповерхностной освещенности  $E_{0n}$ . Последняя величина представляет собой освещенность горизонтальной плоскости, расположенной непосредственно под поверхностью моря и освещаемой таким образом потоком естественного света, уже претерпевшим отражение и

преломление на этой поверхности. Тогда

$$\eta = \frac{E_z}{E_{\text{оп}}} \quad (25)$$

В большинстве случаев рассматривается освещенность сверху  $E_z$  и снизу  $E'_z$  горизонтальных поверхностей, расположенных в море на различных глубинах. График функции  $\eta = \eta(z)$  дает наглядное представление о характере вертикального распределения освещенности, создаваемой естественным светом.

К числу весьма важных гидрооптических характеристик принадлежат коэффициенты диффузного отражения и яркости моря.

Коэффициентом диффузного отражения моря  $\zeta$  называется отношение потока диффузного излучения  $R_z$ , идущего на глубине  $z$  к поверхности моря, к потоку естественного излучения  $S_z$ , идущего на той же глубине вертикально вниз, в глубь моря:

$$\zeta = \frac{R_z}{S_z} \quad (26)$$

Коэффициентом яркости моря  $\rho_{0,\varphi}$  называется отношение яркости диффузного излучения  $B_{0,\varphi}$ , идущего из толщи моря непосредственно под его поверхностью в направлении, определяемом углами  $\theta$  и  $\varphi$  (где  $\theta$  — зенитное расстояние, а  $\varphi$  — азимут), к яркости  $B_0$  идеально белой матовой поверхности, освещенной естественным светом:

$$\rho_{0,\varphi} = \frac{B_{0,\varphi}}{B_0} = \frac{\pi B_{0,\varphi}}{E_0} \quad (27)$$

где  $E_0$  — освещенность поверхности моря.

Зависимость коэффициента яркости моря от длины волны излучения  $\lambda$  характеризует распределение энергии в спектре излучения, выходящего из толщи моря и, следовательно, определяет его собственный цвет<sup>1</sup>.

Из определений следует, что коэффициенты  $\eta$ ,  $\zeta$  и  $\rho$  — величины безразмерные.

При рассеянии свет частично поляризуется. В связи с этим для решения некоторых задач возникает необходимость в получении характеристик поляризации света в морской воде. К основным из них относятся степень поляризации  $P$  и степень деполяризации  $Q$ .

Степенью поляризации  $P$  называется отношение максимальной разности потоков двух взаимно перпендикулярно поляризованных составляющих, на которые может быть разложено данное частично поляризованное излучение, к сумме этих потоков:

$$P = \frac{\Phi_- - \Phi_1}{\Phi_- + \Phi_1} \quad (28)$$

где  $\Phi_-$  — поток частично поляризованного излучения, электрический вектор которого лежит в плоскости рассеяния, а  $\Phi_1$  — поток того же излучения, электрический вектор которого перпендикулярен этой плоскости.

<sup>1</sup> В отличие от видимого цвета моря, который зависит от состояния его поверхности, облачности и угла зрения наблюдателя, собственный цвет моря определяется только физико-химическими характеристиками воды в том или ином районе, и поэтому именно он может и должен интересовать океанолога, гидрографа, мореплавателя и т. д.

Величина

$$Q = \frac{1-P}{1+P} \quad (29)$$

носит название степени деполяризации.

Далеко не всегда учитывается, что показатели ослабления, поглощения и рассеяния для направленного излучения по своим значениям сильно отличаются от этих же показателей для диффузного излучения. Однако это различие часто не находит отражения в специальной литературе. Определим эти характеристики следующим образом.

Показатель поглощения диффузного излучения  $o$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток полностью рассеянного излучения ослабляется в результате поглощения в 10 раз.

Показатель рассеяния диффузного излучения  $b$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток полностью рассеянного излучения ослабляется в результате многократного рассеяния в 10 раз.

Выше были даны определения показателей рассеяния вперед  $\delta$  и назад  $\phi$  для направленного излучения. Для рассмотрения наиболее часто встречающегося в практике случая распространения света от поверхности в глубь моря и в обратном направлении введем такие же понятия и для диффузного излучения.

Показателем рассеяния диффузного излучения вперед  $\xi$  будем называть компоненту показателя рассеяния  $b$ , определяющую долю потока полностью рассеянного излучения, распространяющегося в море в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого направлена вертикально вниз, в глубь моря.

Показателем рассеяния диффузного излучения назад  $\mu$  будем называть компоненту показателя рассеяния  $b$ , определяющую долю потока полностью рассеянного излучения, распространяющегося в море в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого направлена вертикально вверх, к поверхности моря.

Показателем ослабления диффузного излучения  $c$  называется величина, обратная расстоянию, на котором поток полностью рассеянного излучения ослабляется в результате совместного действия поглощения и рассеяния в 10 раз.

Очевидно, что

$$c = a + b, \quad (30)$$

$$b = \xi + \mu. \quad (31)$$

Как и прежде, будем обозначать натуральные показатели поглощения, рассеяния и ослабления через  $a'$ ,  $b'$  и  $c'$ , причем  $a = 0,43 a'$ ;  $b = 0,43 b'$ ;  $c = 0,43 c'$ .

В заключение этого раздела отметим, что аналогично принятому в метеорологии и, в частности, в оптике атмосферы, понятию оптической дальности видимости в гидрооптике применяется понятие глубины видимости.

Под глубиной видимости  $H$  какого-либо объекта понимается то предельное расстояние, на котором этот объект, геометрически доступный наблюдению, виден при данных условиях освещения и данных оптических характеристиках морской воды.

В океанологии нашли широкое распространение наблюдения над «прозрачностью» и «цветом» морской воды. При этом под прозрачностью понимается глубина видимости погруженного в море белого стандартного ди-

ска, выраженная в метрах. Совершенно очевидно, что эта величина совсем не равноценна прозрачности морской воды  $\theta$  в обычном физическом смысле, определяемой равенством (9). Поэтому в дальнейшем, во избежание неточностей, результаты измерений по диску будут именоваться глубиной видимости диска, или относительной прозрачностью  $h$ . Под цветом морской воды  $C$  понимается номер раствора стандартной шкалы цветности, окраска которого наиболее близка к цвету столба воды над диском в месте наблюдений.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В МОРЕ

Не вдаваясь в детальное рассмотрение сложных закономерностей распространения излучения в море, безусловно выходящее за рамки настоящей работы, остановимся только на некоторых основных теоретических положениях, необходимых для выбора и обоснования тех или иных методов измерений гидрооптических характеристик и рассмотрения зависимостей между ними. Для этой цели воспользуемся исследованиями В. А. Амбарцумяна (1943, 1944), А. Г. Гамбурцева (1924) и И. Ирзефа (1950).

Вопрос о расчете светового режима моря сводится к решению уравнения распространения излучения в поглощающей и рассеивающей среде, т. е. к решению так называемого уравнения переноса излучения, которое может быть записано в следующей общей форме:

$$\frac{dJ}{dl} = -\epsilon'J + i. \quad (32)$$

Через  $J$  обозначена интенсивность излучения, распространяющегося в среде в направлении  $l$ ; через  $i$  — коэффициент излучения, а через  $\epsilon'$  — натуральный показатель ослабления. В задачах гидрооптики можно пренебрегать собственным излучением моря и считать, что излучательная способность морской воды равна ее рассеивающей способности. Тогда коэффициент  $i$  будет выражать количество энергии, рассеянное единицей объема воды в единице телесного угла, ось которого составляет угол  $\gamma$  с направлением падающих лучей:

$$i = \frac{\sigma}{4\pi} \int x(\gamma) J d\omega. \quad (33)$$

Это уравнение носит название уравнения лучевого равновесия.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай — ослабление направленного потока (например прямых солнечных лучей), распространяющегося вертикально в глубь моря в направлении оси  $z$ . Уравнение переноса излучения запишется в простой форме:

$$\frac{dJ}{dz} = -\epsilon'J. \quad (34)$$

Интегрируя это уравнение и переходя от интенсивности излучения к потоку, получим уже упоминавшийся выше закон Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon'z}. \quad (35)$$

Из простых геометрических соображений следует, что если солнечные лучи падают на поверхность моря не отвесно, а под некоторым углом  $\theta$ , где  $\theta$  — зенитное расстояние солнца, то в случае гладкой поверхности моря поток направленного излучения  $\Phi$ , достигший глубины

з, будет составлять:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-k' z \sec \theta'} \quad (36)$$

где, в свою очередь,  $\theta'$  — угол преломления солнечных лучей, связанный с зенитным расстоянием солнца простым соотношением:

$$\sin \theta' = \frac{1}{n} \sin \theta. \quad (37)$$

Здесь через  $n$  обозначен показатель преломления морской воды.

Положив в показателе степени при  $z$  в формуле (36)  $\epsilon'_1 = \epsilon' \sec \theta'$ , что соответствует формальной замене увеличения пути направленного излучения увеличением значения показателя ослабления, закон Бугера можно записать в следующем виде:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon'_1 z}. \quad (38)$$

Выше уже упоминалось, что закон Бугера в такой форме справедлив только для направленного монохроматического излучения, распространяющегося в однородной среде. При неоднородной среде, но монохроматическом излучении, вместо (35), имеем:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\int_0^z \epsilon' dz}. \quad (39)$$

Если в море распространяется поток немонахроматического, но направленного излучения (например поток прямых солнечных лучей), то даже в этом сравнительно простом случае изменение с глубиной рассматриваемого потока не может быть выражено простым законом ослабления, так как показатель  $\epsilon'$  становится зависящим от распределения энергии в спектре излучения. В свою очередь, это распределение непрерывно меняется с глубиной вследствие селективности процессов поглощения и рассеяния. Поэтому даже в случае однородной среды показатель  $\epsilon'$  будет являться функцией не только длины волны  $\lambda$ , но и глубины  $z$ , т. е.  $\epsilon' = \epsilon'(\lambda, z)$ . Введем понятие о некотором среднем значении показателя  $\epsilon'$  для потока излучения, заключенного в интервале длин волн  $(\lambda_1, \lambda_2)$  и распространяющегося от поверхности моря до глубины  $z$ . В силу закона спектральной аддитивности поток немонахроматического излучения  $\Phi_z$  на глубине  $z$  может быть представлен как

$$\Phi_z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda,z} d\lambda, \quad (40)$$

где  $\Phi_{\lambda,z}$  — поток монохроматического излучения, заключенного в интервале длин волн  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$  на глубине  $z$ .

Среднее значение  $\bar{\epsilon}'$  находится из равенства (35):

$$\bar{\epsilon}' = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon'_{\lambda} \Phi_{\lambda,z} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda,z} d\lambda}, \quad (41)$$

где  $\epsilon_{\lambda}$  — показатель ослабления монохроматического излучения в интервале длин волн  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ .

Тогда закон ослабления потока немонахроматического, по направлению излучения принимает вид:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\int_0^z \bar{\kappa} dz} \quad (42)$$

Для случая распространения в среде только диффузного излучения, идущего под углом  $\theta$  к вертикали, В. А. Амбарцумян (1943) находит решение уравнения переноса излучения в виде:

$$J = \frac{b(0) e^{-k\tau}}{1 + k \cos \theta} \quad (43)$$

где  $\tau$  — оптическая глубина,  $b(\theta)$  — некоторая функция, зависящая от углового распределения энергии излучения,  $k$  — параметр, зависящий от индикатрисы рассеяния и от соотношения между рассеянием и общим ослаблением.

Для преимущественно рассеивающих сред параметр  $k$  определяется как

$$k = \sqrt{(1-s)(3-x_1)} \quad (44)$$

где  $s$  — доля рассеяния в общем ослаблении, т. е.  $s = \frac{\sigma}{\kappa}$ , а  $x_1$  — первый коэффициент в разложении индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра:

$$x_1 = \frac{3}{2} \int_0^\pi x(\gamma) \cos \gamma \sin \gamma d\gamma.$$

Основные закономерности наиболее общего случая — распространения в море смешанного, т. е. одновременно направленного и диффузного излучения (например, естественного света при солнце, не закрытом облаками), рассмотрим, базируясь на теоретических разработках А. Г. Гамбурцева (1924) и Иозефа (Joseph, 1950). При этом ограничимся случаем, когда море достаточно глубоко, т. е. когда отражение от дна не влияет на интенсивность распространяющегося в море излучения. Такое предположение вполне допустимо, так как уже на расстоянии, равном глубине видимости диска, альбедо дна практически не сказывается.

Для исследования закономерностей изменения потока излучения  $S$ , близкого к диффузному, идущего в глубь моря и потока  $R$ , распространяющегося в море вертикально вверх к его поверхности, Гамбурцев составляет следующие уравнения, представляющие собой уравнения переноса излучения, записанные в развернутом виде (в наших обозначениях):

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dz} &= -aS - \mu S + \mu R \\ -\frac{dR}{dz} &= -aR - \mu R + \mu S \end{aligned} \quad (45)$$

Гамбурцев решает эти уравнения совместно относительно величины  $\frac{R}{S}$ , которая, согласно определению (26), представляет собой коэффициент диффузного отражения моря  $\zeta$ . Решение находится в виде:

$$\zeta = \frac{R}{S} = \frac{a + \mu - \sqrt{a^2 + 2a\mu}}{\mu} \quad (46)$$

Напомним, что через  $a$  обозначен показатель поглощения, а через  $\mu$  — показатель рассеяния назад для диффузного излучения.

Рассмотрим теперь распространение в море одновременно и направленного и диффузного излучений. Выделим на глубине  $z$  из общего потока излучения  $S$  его компоненту  $F$ , представляющую собой чисто диффузный поток и обозначим по-прежнему направленный поток через  $\Phi$ . В этом случае система уравнений (45) Гамбурцева должна быть дополнена членами  $\delta\Phi$  и  $\phi\Phi$ , учитывающими изменение потоков  $F$  и  $R$  за счет добавления компонентов рассеянного вперед (показатель  $\delta$ ) и назад (показатель  $\phi$ ) излучения направленного потока  $\Phi$ . Тогда, вместо уравнения (45), имеем:

$$\begin{aligned}\frac{dF}{dz} &= -aF - \mu F + \mu R + \delta\Phi \\ -\frac{dR}{dz} &= -aR - \mu R + \mu F + \phi\Phi \\ \frac{d\Phi}{dz} &= -\epsilon\Phi = -(\kappa + \sigma)\Phi.\end{aligned}\quad (47)$$

Третье уравнение этой системы представляет собой не раз уже упоминавшееся выше уравнение переноса излучения для направленного потока (34). Введем такие же граничные условия, как и при интегрировании уравнения (34), т. е. положим, что

$$\Phi_{(0)} = \Phi_0, \quad F_{(0)} = F_0 \quad \text{и} \quad S_{(0)} = S_0.$$

Иначе говоря, обозначим через  $\Phi_0$ ,  $F_0$  и  $S_0$  соответственно потоки направленного, диффузного и общего (смешанного) излучения, только что вошедшего под поверхность моря. При этом очевидно, что

$$S_0 = F_0 + \Phi_0.$$

Решение системы (47) Иозеф (переходя от натуральных показателей к десятичным и сохраняя наши обозначения) находит в виде:

$$\begin{aligned}S &= [S_0 + n_2\Phi_0(1 - 10^{-(\epsilon-q)z})] 10^{-qz} \\ R &= \left[ S_0 + n_2\Phi_0 \left(1 - \frac{n_1}{n_2} \frac{q+a}{q-a} 10^{-(\epsilon-q)z} \right) \right] \frac{q-a}{q+a} 10^{-qz}.\end{aligned}\quad (48)$$

В этих равенствах обозначено:

$$n_1 = \frac{\sigma(\mu - \phi) + \phi(a - \kappa)}{\epsilon^2 - q^2}; \quad n_2 = \frac{(a + \epsilon)(a - \kappa + \mu - \phi)}{\epsilon^2 - q^2}; \quad q = \sqrt{a(a + 2\mu)}.\quad (49)$$

Остальные обозначения прежние.

Физический смысл параметра  $q$  становится ясным из следующих соображений. Если в море распространяется только диффузное излучение (например, при полной облачности, при распространении дневного света на достаточно больших глубинах, при значительном удалении от источников искусственного освещения и т. д.), то уравнения (48) существенно упрощаются, так как  $\Phi_0$  становится равным нулю, а  $S_0 = F_0$ . Тогда

$$\begin{aligned}F &= F_0 \cdot 10^{-qz}, \\ R &= F_0 \frac{q-a}{q+a} \cdot 10^{-qz}.\end{aligned}\quad (50)$$



Нетрудно видеть, что первое уравнение совершенно идентично закону Бугера, а параметр  $q$  представляет собой не что иное, как показатель ослабления диффузного излучения в морской воде  $s$ , т. е.

$$q = s = \sqrt{a(a + 2\mu)}. \quad (51)$$

В заключение отметим, что уравнения (48) и (50), строго говоря, справедливы только для монохроматического света. При точных расчетах, связанных с распространением немонахроматического излучения, значения показателей  $s$  и  $q = s$  должны заменяться их средними значениями, вычисляемыми аналогично (41).

### 3. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

К числу основных задач гидрооптического исследования того или иного моря или океанического района относятся: 1) получение спектральных характеристик прозрачности воды на различных глубинах; 2) расчет светового режима моря, т. е. расчет поля излучения, создаваемого естественным светом в любой точке толщи моря.

Первая из этих задач требует для своего решения знания только показателей ослабления света в различных участках спектра, определяемых содержащейся в воде органической и неорганической взвесью и растворенными в воде окрашенными органическими веществами.

Расчет светового режима моря сводится к решению уравнения переноса излучения. Для решения этого уравнения, как это следует из предыдущего раздела и из рассматриваемых ниже зависимостей между различными гидрооптическими характеристиками, оказывается необходимым знание следующих величин: показателей поглощения, рассеяния и ослабления света в воде, индикатрисы рассеяния, показателя вертикального ослабления и коэффициента диффузного отражения моря. Ряд практических задач, связанных с видимостью подводных объектов и их маскировкой, требует, кроме того, еще знания коэффициента яркости моря. Для полного расчета светового режима моря, так же как и для ответа на многие вопросы, выдвигаемые развитием морской техники и постановкой современных гидробиологических исследований, необходимы данные о спектральных характеристиках перечисленных элементов ослабления излучения в море.

Для определения гидрооптических характеристик служат методы как непосредственные, так и лабораторные, т. е. измерения могут проводиться приборами, погружаемыми в море, или выполняться на пробах морской воды при помощи аппаратуры, находящейся в судовой лаборатории. Некоторые из только что перечисленных характеристик, такие, например, как показатель вертикального ослабления и коэффициенты яркости и диффузного отражения моря, могут определяться только из непосредственных измерений. Некоторые же, как, например, индикатриса рассеяния, наоборот, в настоящее время могут измеряться только в лабораторных условиях. Одна из важнейших оптических характеристик — спектральная прозрачность морской воды, — однозначно определяющая ее спектральные показатели ослабления, — может измеряться как непосредственно, так и лабораторными методами. Непосредственные измерения, достоинства которых совершенно очевидны, обладают в то же время тем крупным недостатком, что глубина погружения современных оптических приборов, связанных с судном кабелем, весьма ограничена и практически не



превышает 150 — 200 м и только в редких случаях (при условии применения очень легких и прочных несущих каротажных кабелей) достигает 400—500 м. Измерения же на пробах морской воды, получаемых из батометров, естественно, могут проводиться до очень больших глубин. Так, например, при работах на э/с «Витязь» определения оптических характеристик проводились до глубины 9400 м. При лабораторных исследованиях легче выполнять измерения в различных областях спектра, причем качество измерений значительно меньше подвержено влиянию погодных условий, чем при непосредственных наблюдениях. Крупным недостатком лабораторных исследований является невозможность детального зондирования вертикального распределения оптических характеристик, в то время как при непосредственных измерениях значения этих характеристик могут определяться очень часто. Последнее обстоятельство приобретает весьма существенное значение при исследовании слоев с повышенным содержанием фито- и зоопланктона, при определении местоположения слоев скачка плотности и т. д. Таким образом, как той, так и другой группы методов присущи определенные достоинства и недостатки, и обе эти группы отнюдь не исключают, а дополняют одна другую и при работах в море должны применяться совместно.

### 1) Непосредственные измерения оптических характеристик морской воды

#### а) Измерения подводной освещенности

Измерения подводной освещенности, как это следует из равенств (24), (25) и (26), позволяют находить следующие гидрооптические характеристики: показатель вертикального ослабления  $x$ , коэффициент подводной освещенности  $\eta$  и коэффициент диффузного отражения моря  $\zeta$ . Получение последней величины, помимо измерения освещенности сверху горизонтальных поверхностей, расположенных в море на различных глубинах, требует также измерения освещенности этих поверхностей снизу, т. е. освещенности, создаваемой диффузным светом, распространяющимся в море из более глубоких слоев к его поверхности. В связи с тем, что освещенность поверхности моря может быть подвержена очень резким и сильным колебаниям, которые, безусловно, сказываются и на колебаниях подводной освещенности, все измерения этой величины должны обязательно сопровождаться измерениями наружной освещенности.

Для измерений подводной освещенности служит фотоэлектрический фотометр ФМПО-57. Прибор состоит из подводной части (рис. 2) и регистратора, находящегося на борту судна, соединенных между собой кабелем. Подводная часть прибора представляет собой герметичный корпус (1), в который вмонтировано пять фотоэлементов (2). Четыре из них обращены своей светочувствительной поверхностью кверху, т. е. к поверхности моря; а пятый — вниз к его дну. Для обеспечения возможности проведения измерений не только в белом свете, а и в трех участках видимой части спектра, из четырех фотоэлементов обращенных вверх, три закрыты светофильтрами. Все фотоэлементы помещены за защитными иллюминаторами из молочного стекла (3). Применение этих стекол имеет двойную цель. Во-первых, без них, вследствие явления полного внутреннего отражения на нижней поверхности защитных иллюминаторов, на фотоэлементы попадали бы только лучи, составляющие с вертикалью углы, меньшие, чем  $48,5^\circ$ , т. е. сосредоточенные в отвесно расположенном световом конусе с углом при вершине, равном  $97^\circ$ . Применение молочных стекол позволяет устранить этот эффект и фотоэлементы принимают излучение, посту-

падающее со всей полусферы. Во-вторых, помещение светофильтров под молочные стекла обеспечивает постоянство пути световых лучей при их прохождении через фильтр, вне зависимости от углового распределения энергии в падающем потоке. Без молочных стекол лучи, падающие под большими углами к вертикали, проходили бы и больший путь через фильтр и, следовательно, ослаблялись бы сильнее, чем лучи, падающие более отвесно.

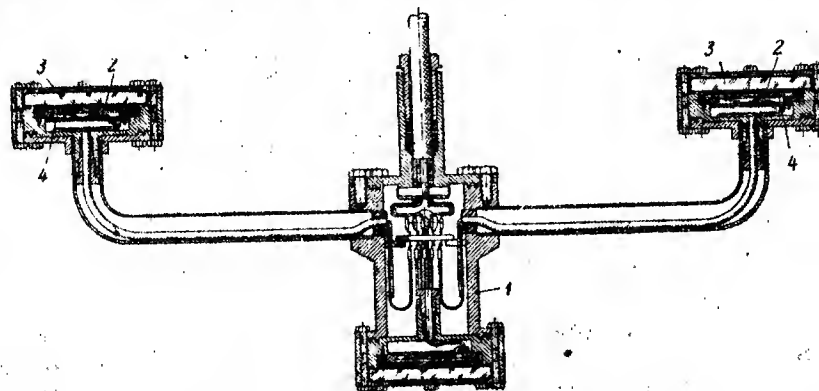


Рис. 2. Фотоэлектрический фотометр для измерения подводной освещенности ФМПО-57

В приборе применены селеновые фотоэлементы с запирающим слоем, площадью светочувствительной поверхности  $20 \text{ см}^2$ . Интегральная чувствительность каждого из фотоэлементов составляет около  $300 \text{ мкА/люмен}$ .

Регистрирующая часть прибора представляет собой потенциометр ЭПП-09 отечественного производства; очень хорошо зарекомендовавший себя при работе в морских условиях.

При наблюдениях прибор опускается в море на кабеле марки КРП6  $\times$  1,5, имеющем, кроме токопроводящих жил, стальной сердечник. Прибор всегда опускается с борта, освещенного солнцем. Предельная глубина погружения составляет 150 м.

Для возможности проведения измерений в широком интервале освещенностей от десятков тысяч люкс в поверхностных слоях моря до незначительных освещенностей на глубинах 120 — 150 м, потенциометр снабжен системой шунтов, делящих весь диапазон измерений на пять частей.

Измерение подводной освещенности ведется с погрешностью, не превышающей 10% от измеряемой величины.

В приборе применяются стеклянные светофильтры (4) отечественного производства — синий СС-4 (эффективная длина волны  $\lambda_{\text{эф}} = 400 \text{ м}\mu$ ), зеленый ЗС-1 ( $\lambda_{\text{эф}} = 520 \text{ м}\mu$ ) и красный ( $\lambda_{\text{эф}} = 604 \text{ м}\mu$ ).

Электропитание прибора осуществляется от судовой сети постоянного тока напряжением 110 или 220 в.

Для одновременного измерения освещенности поверхности моря успешно применяется объективный люксметр Ю-16, выпускаемый Ленинградским заводом «Вибратор». В связи с тем, что этот прибор градуируется только для сравнительно небольших освещенностей, при проведении измерений требуется применение ослабляющих нейтральных фильтров (НС-6, НС-7, НС-8, НС-9 и НС-10), обеспечивающих возможность проведения измерений при любых природных освещенностях, вплоть до их максимального значения (130 000 люкс.). Так как стеклянные фильтры имеют зеркальную поверхность, при измерениях они

помещаются между приемником объективного люксметра (в качестве которого используется также селеновый фотоэлемент) и молочным стеклом. Для измерения освещенности поверхности моря в различных областях спектра объективный люксметр снабжается комплектом светофильтров тех же самых марок, что и фотоэлектрический фотометр. При измерениях светофильтры всегда помещаются между фотоэлементом и молочным стеклом.

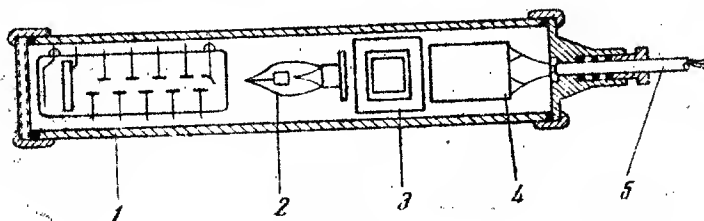


Рис. 3. Схема измерителя малых освещенностей

Пользуясь соотношениями (24), (25) и (26), по данным измерений вычисляются показатели вертикального ослабления для различных слоев моря и коэффициенты подводной освещенности и диффузного отражения моря.

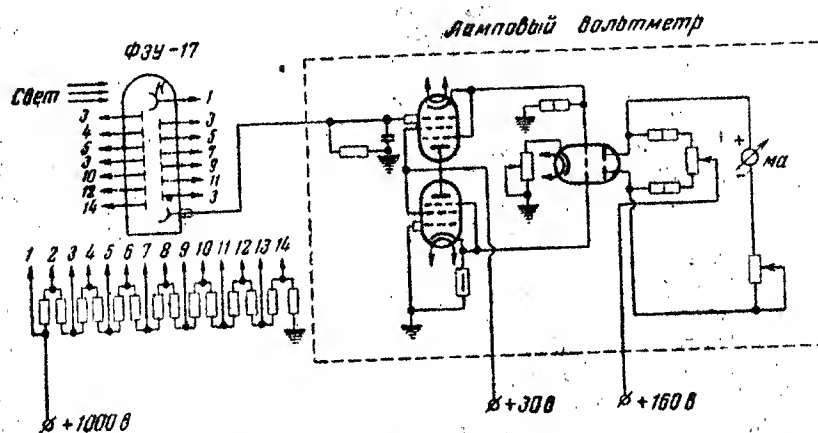


Рис. 4. Электрическая схема измерителя малых освещенностей

Для возможности измерения очень малых освещенностей на больших глубинах в ИОАНе был сконструирован и построен объективный погружаемый фотометр, приемником светового потока в котором служит фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-17 или ФЭУ-19. Прибор рассчитан на работу до глубин 400 — 500 м. Принципиальная схема прибора представлена на рис. 3. Измеряемый поток излучения естественного света принимается катодом фотоумножителя (1), представляющим собой полупрозрачный сурьмяно-цезиевый слой, нанесенный на внутреннюю поверхность колбы умножителя. Блок питания умножителя состоит из кенотрона (2), трансформатора (3) и конденсатора (4). На умножитель подается переменный ток напряжением около 1000 В для ФЭУ-17 и около 1200 В для ФЭУ-19. Сигнал фотоумножителя, пропорциональный интенсивности падающего излучения, по кабелю (5) подается на измерительный прибор, в качестве которого используется ламповый вольтметр. На рис. 4 дана электрическая схема прибора.

### б) Измерения показателя ослабления (прозрачности) морской воды

Измерения производятся при помощи фотоэлектрического фотометра — прозрачномера ФПМ-57. Прибор, оптическая схема которого показана на рис. 5, представляет собой дифференциально-нулевой фотометр, предназначенный для измерения показателя ослабления света в море как в белом свете, так и в пяти участках видимой части спектра.

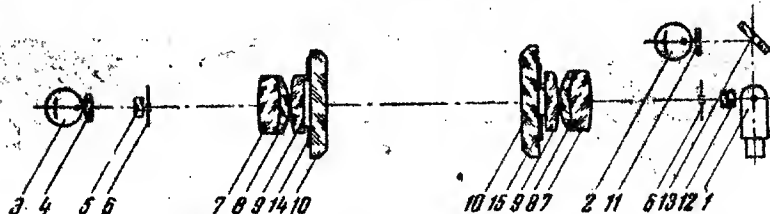


Рис. 5. Оптическая схема фотоэлектрического фотометра — прозрачномера ФПМ-57

1 — осветитель; 2 — опорный фотоэлемент; 3 — измерительный фотоэлемент;  
4 и 12 — конденсоры; 5 — светофильтры; 6, 14 и 15 — диафрагмы; 7, 8 и  
9 — системы линз; 10 — защитные стекла; 11 — теплоизоляционная  
пластина; 13 — зеркало

Прибор состоит из подводной части и регистратора, находящегося на борту судна.

В погружаемой части прибора помещен источник искусственного света, в качестве которого используется лампа накаливания СЦ-61. После прохождения через вращающийся диск — модулятор и исследуемый слой морской воды световой поток от лампы попадает на фотоэлемент. Другая часть потока от лампы направляется на опорный фотоэлемент, сигнал которого при помощи электрического ослабителя уравнивается с сигналом фотоэлемента, освещенного светом, прошедшим через морскую воду. Приемники 2 и 3 представляют собой сурьмяно-цезиевые фотоэлементы СЦВ-3, подбираемые с возможно более близкими фотометрическими характеристиками.

В основу работы прибора заложен принцип следящей системы. Модулированные вращающимся диском световые потоки преобразуются фотоэлементами в переменный ток, пропорциональный падающим потокам. Переменные напряжения с измерительного и опорного фотоэлементов в противофазе подаются на катодные повторители, откуда поступают в усилитель-преобразователь. В смесителе усилителя-преобразователя напряжения измерительного и опорного фотоэлементов векторно суммируются, и результирующее напряжение сигнала (разбаланс) через усилитель поступает на синхронный детектор. Кроме того, на тот же синхронный детектор поступает и опорное напряжение. На выходе синхронного детектора возникает постоянный ток, полярность которого зависит от знака разбаланса в смесителе, а величина — пропорциональна амплитуде разбаланса. Сигнал постоянного тока с синхронного детектора поступает на усилитель регистрирующей части.

Прибор позволяет проводить измерения показателя ослабления света в море на глубинах от 0 до 150 м в водах различной мутности — от высоко прозрачных вод открытых океанических районов ( $\epsilon = 0,05 \text{ 1/м}$ ) до мутных прибрежных вод ( $\epsilon = 2,00 \text{ 1/м}$ ). Регистрация показателя ослабления ведется с относительной погрешностью, не превышающей 1%.

В качестве регистратора используется потенциометр ЭПП-09 с внесенными в его конструкцию некоторыми изменениями, позволяющими вести

регистрацию значений показателей ослабления в широком диапазоне мутностей воды примерно с одинаковой точностью.

Для возможности измерения прозрачности воды на больших глубинах прибор снабжается съемной кюветой, помещаемой между осветителем и фотозлементом. В этом случае прибор находится на борту судна, и кювета заполняется водой из батометров. Объем кюветы составляет всего

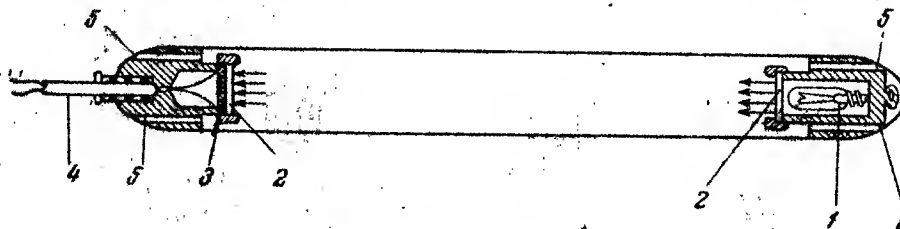


Рис. 6. Буксируемый прозрачномер ИОАН

500 см<sup>3</sup>, что обеспечивает проведение массовых измерений при взятии стандартных гидрологических серий.

Подводная и регистрирующая части прибора связаны между собой кабелем марки КРП 6 × 1,5.

Электропитание прибора осуществляется от судовой сети переменного тока напряжением 220 в.

Для возможности непрерывной регистрации прозрачности воды в поверхностных слоях моря на ходу судна Институтом океанологии сконструирован буксируемый прозрачномер (рис. 6). Прибор представляет собой объективный фотометр, в котором световой поток, посылаемый лампой (1), после прохождения слоя воды толщиной в 1 м принимается фотоспротивлением ФСК-1 (3). Лампа и фотоспротивление закрыты защитными стеклянными иллюминаторами (2). Подводная часть прибора соединяется с регистратором, в качестве которого также используется потенциометр ЭПП-09, каротажным кабелем (4) марки КТШ-03, имеющим, кроме токопроводящих медных жил, несущие стальные жилы. Вырезы (5) в корпусе прибора выполнены таким образом, чтобы обеспечить свободный доступ воды в прибор и в то же время не допустить попадания естественного света на фотозлемент при работе с прибором в светлое время суток.

#### в) Измерения коэффициента яркости моря

Измерения производятся при помощи гидрофотометра ИФТ-19. Оптическая схема его показана на рис. 7. Прибор представляет собой визуальный фотометр, основанный на уравнивании яркостей двух полей, одно из которых создается светом, выходящим из толщи моря, а другое — естественным светом солнца и неба, освещающим горизонтальную пластинку матированного молочного стекла. Прибор снабжен трубой, нижний конец которой погружается под поверхность моря. Свет, идущий из толщи моря, через линзы оборачивающей системы поступает в фотометрическую призму, служащую для уравнивания яркостей обеих полей. Уравнивание производится перемещением молочного стекла при помощи рычажной системы. Отсчеты ведутся через окуляр по секторной шкале, освещаемой через иллюминатор. Для возможности проведения измерений в различных участках спектра прибор снабжен револьверной диафрагмой со сменными фильтрами. Таким образом, помимо измерений в белом свете, прибор



дает возможность вести измерения в следующих областях видимой части спектра: синей ( $\lambda_{\text{эф}} = 459 \text{ м}\mu$ ), сине-зеленой ( $\lambda_{\text{эф}} = 494 \text{ м}\mu$ ), зеленой ( $\lambda_{\text{эф}} = 528 \text{ м}\mu$ ), желто-зеленой ( $\lambda_{\text{эф}} = 556 \text{ м}\mu$ ), оранжевой ( $\lambda_{\text{эф}} = 587 \text{ м}\mu$ ), красной ( $\lambda_{\text{эф}} = 600 \text{ м}\mu$ ). Отсчеты по шкале прибора переводятся в коэффициенты яркости моря с применением данных градуировок прибора.

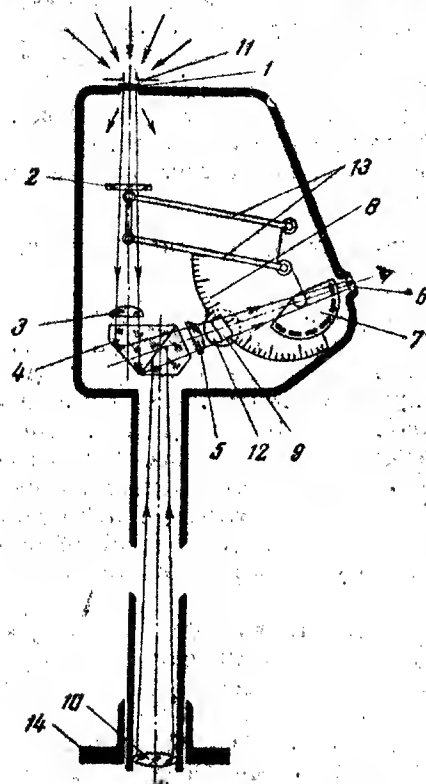


Рис. 7. Оптическая схема гидрофотометра ИФТ-19

1 — пластина матированного молочного стекла; 2 — подвижное молочное стекло; 3 и 5 — линзы; 4 — фотометрическая призма; 6 — окуляр; 7 — сменные светофильтры; 8 — секторная шкала; 9 — направляющая призма; 10 — линза оборачивающей системы; 11 — диафрагма; 12 — иллюминатор; 13 — рычажная система; 14 — фланец

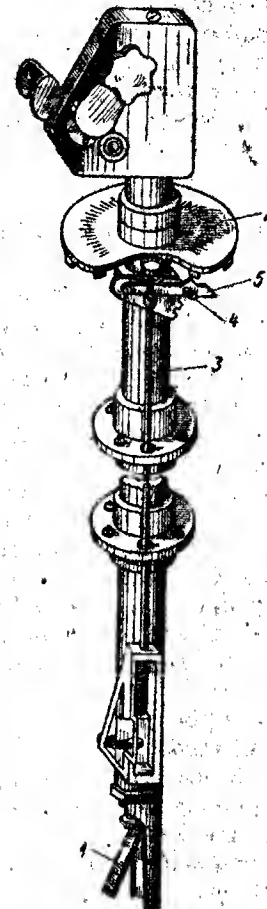


Рис. 8. Приспособление для измерения индикатрис яркости моря

Относительная погрешность определения коэффициента яркости моря составляет от 5 до 15 %, в зависимости от значения измеряемой величины.

Для измерения коэффициентов яркости излучения, выходящего из толщи моря не только вертикально вверх, но и под различными углами к вертикали и в различных азимутах по отношению к солнцу, прибор снабжается специальным приспособлением (рис. 8), заменяющим нижнее концевое колено трубы прибора. Приспособление состоит из плоского зеркала (1), устанавливаемого под входным иллюминатором трубы прибора, и механизма для его поворота и качания. Для проведения измерений в различных азимутах зеркало поворачивается штурвалом (2), перемещающим это зеркало при помощи ходового валика (3). Штурвал

снабжен лимбом, показывающим азимут, в котором ведутся измерения. Установка требуемого наклона зеркала осуществляется при помощи рукоятки (4). Фиксатор (5) закрепляет зеркало в трех положениях, позволяющих измерять коэффициент яркости излучения, идущего из глубоких слоев моря к его поверхности, под углами к вертикали 30, 60 и 90°.

Измерения производятся на якорных и дрейфовых станциях с борта, освещенного солнцем. Для проведения измерений прибор крепится к борту корабля специальными опорными платами. При работе с высокобортовых судов, когда максимальная длина прибора (3,5 м) оказывается недостаточной, можно рекомендовать крепление прибора за бортом на навесной беседке — трапе, как это делалось в практике экспедиционных работ на э/с «Витязь». Система такого крепления прибора представлена на рис. 9.

## 2) Лабораторные измерения оптических характеристик морской воды

Измерения производятся при помощи спектрогидрофелометра-прозрачномера ИФ-25<sup>1</sup>. Прибор, общий вид которого изображен на рис. 10, позволяет определять в белом свете и шести различных участках видимой части спектра коэффициенты пропускания морской воды и ее показатели яркости для различных углов рассеяния. По этим данным определяются основные оптические характеристики воды — показатели рассеяния и ослабления и индикатриса рассеяния. Эти характеристики, в свою очередь, дают возможность определить значения показателя поглощения и оценить долю поглощения и рассеяния в общем ослаблении направленного потока в морской воде. Измерения могут выполняться как в неполяризованном, так и в поляризованном свете.

Прибор представляет собой визуальный фотометр, в котором яркость пропущенного или рассеянного водой света сравнивается с известной заранее яркостью пластины молочного стекла. Оптическая схема прибора представлена на рис. 11.

Кювета прибора заполняется исследуемой водой, которая либо прокачивается насосом, либо берется батометрами. Осветитель прибора состоит из лампы накаливания, конденсора, диафрагм и объектива. Осветитель укреплен на поворотном лимбе, закрывающем кювету прибора и вращающимся вокруг оси.

Для измерений показателя ослабления осветитель ставится в крайнее заднее положение, и свет от него, пройдя толщу воды в приборе, отражается от сферического зеркала, после чего достигает объектива фотометра, в фокальной плоскости которого помещено устройство для создания полей сравнения. Проведение измерений яркости света, рассеянного под различными углами, достигается поворотом осветителя на тот или иной угол. В этом случае объектив фотометра освещается светом, рассеянным толщей воды, лежащей в плоскости параллельных лучей, идущих от осветителя.

Ветвь сравнения фотометра состоит из поворотного осветителя, включающего в себя лампу и молочное стекло, из неподвижного молочного стекла и фотометрической призмы.

Яркости рассеянного или пропущенного водой света сравниваются с яркостью неподвижного молочного стекла. Таким образом, одно из полей сравнения освещается светом, прошедшим через воду, а другое —

<sup>1</sup> После сдачи статьи в печать на основе прибора ИФ-25 был разработан и изготовлен новый усовершенствованный спектрогидрофелометр СГН-57.

осветителем в ветви сравнения фотометра. На уравнивании яркостей этих полей и основаны измерения.

Измерительное устройство смонтировано на корпусе фотометра, выполненном в виде литой чаши, являющейся кюветой прибора. На этом же корпусе закреплены объектив фотометра, окуляр и светофильтры. При измерениях осветитель фотометра перемещается с помощью рычажно-винтового механизма, приводимого в движение барабаном. Вращением барабана в ту или другую сторону добиваются равенства яркостей фотометрических полей, после чего по нанесенным на барабан делениям снимается отсчет.

Яркость рассеянного в морской воде света может меняться в зависимости от содержания взвеси и различия в углах рассеяния в сотни тысяч и даже миллионы раз. Для возможности измерения яркостей в столь широком диапазоне в измерительной ветви фотометра помещаются сменные диафрагмы, а в ветви сравнения — дополнительный ослабитель. Смена диафрагм обуславливает необходимость наличия в приборе двух зрачков выхода — круглого и сегментного.

Для проведения измерений в поляризованном свете перед объективом осветителя устанавливается насадка-поляризатор, а перед зрачком выхода помещается насадка-анализатор.

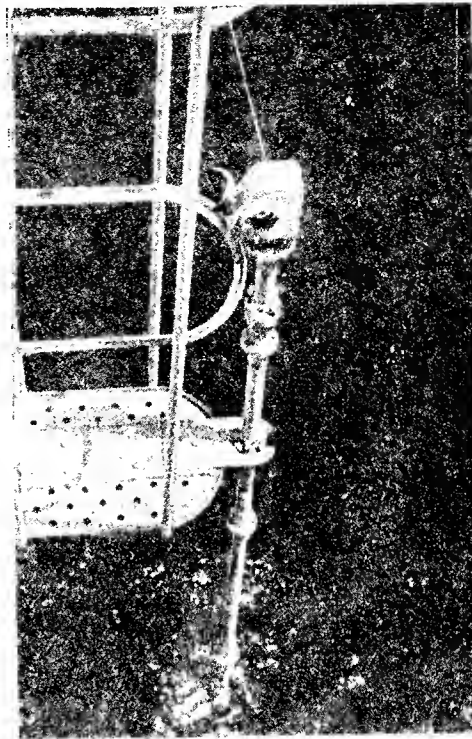


Рис. 9. Крепление гидрофотометра ИФТ-19 на высокобортном судне

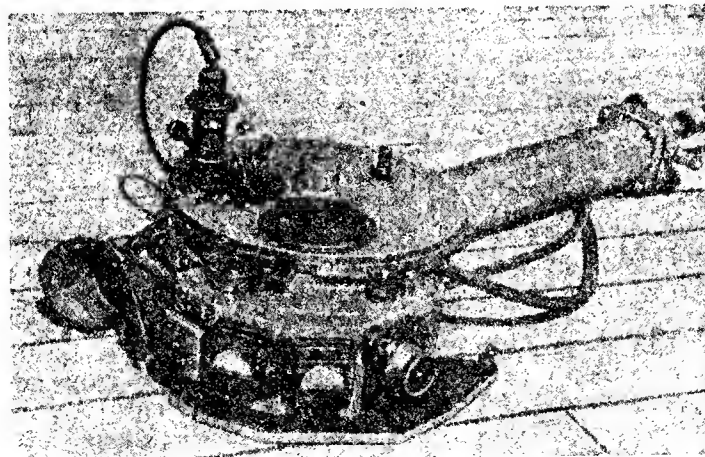


Рис. 10. Общий вид спектрогидрофотометра-прозрачгомера ИФ-25



Лампа осветителя прибора включается последовательно с лампой фотометра, что обеспечивает одинаковый режим их работы вне зависимости от возможных колебаний напряжения в источнике питания. Подаваемое на прибор напряжение и сила тока, идущего через лампы, фиксируются вольтметром и амперметром. Электропитание прибора осуществляется постоянным током напряжением 16 в.

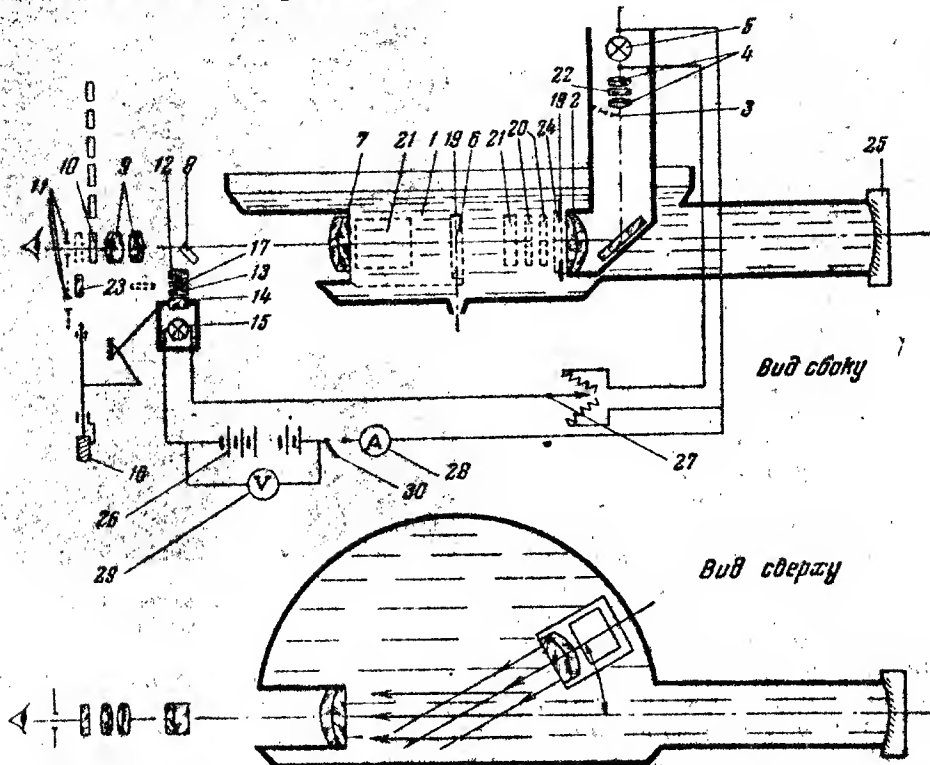


Рис. 11. Оптическая схема спектрогидрофелометра-прозрачномера ИФ-25

1 — кювета прибора; 2 — объектив осветителя; 3 — диафрагма; 4 — конденсор; 5 и 15 — лампы накаливания; 6 — направляющий пистолет (ось кюветы прибора); 7 — объектив фотометра; 8 — фотометрическая призма; 9 — окуляр; 10 — светофильтры; 11 — сменные экраны выхода; 12, 13 и 14 — молочные стекла фотометра; 16 — отчетный барабан; 17 — дополнительный ослабитель; 18 — сменные диафрагмы; 19 — стационарная градуировочная пластинка; 20 — градуировочные нейтральные фильтры; 21 — запонки; 22 — молочное стекло осветителя; 23 — насадка-анализатор; 24 — насадка-поляризатор; 25 — сферическое зеркало; 26 — аккумуляторы; 27 — реостат; 28 — амперметр; 29 — вольтметр; 30 — переключатель.

Для проведения измерений в различных участках спектра прибор снабжен комплектом светофильтров, состоящим из шести образцов — синего ( $\lambda_{\text{сф}} = 475 \text{ м}\mu$ ), зеленого ( $\lambda_{\text{сф}} = 520 \text{ м}\mu$ ), желто-зеленого ( $\lambda_{\text{сф}} = 544 \text{ м}\mu$ ), оранжевого ( $\lambda_{\text{сф}} = 568 \text{ м}\mu$ ) и двух красных ( $\lambda_{\text{сф}} = 604 \text{ м}\mu$  и  $\lambda_{\text{сф}} = 648 \text{ м}\mu$ ).

Водозаборная часть прибора состоит из насоса и системы шлангов для подачи воды в прибор и ее слива. Центробежный насос приводится в действие электромотором МУ-80, работающим как на переменном, так и на постоянном токе напряжением 110 и 220 в. Насос вполне обеспечивает подъем воды на 3—4 м от ватерлинии судна.

Общий объем воды в приборе составляет около 3 л, что несколько затрудняет исследования оптических характеристик глубоких слоев, когда

прокачка воды насосом невозможна из-за недостаточной длины шланга и пробы приходится брать батометрами.

Отсчеты, снятые с барабана прибора, при помощи соответствующих градуировочных графиков переводятся в коэффициенты пропускания и показатели яркости воды, по которым затем, пользуясь равенствами (7), (16), (19) и (20), вычисляются показатели ослабления и рассеяния света в воде и строится индикатриса рассеяния.

Погрешность определения показателя ослабления колеблется от 3—5% для мутных вод до 12—15% для чистых вод открытых океанических районов. Относительная погрешность определения показателя рассеяния в среднем составляет около 15%.

#### 4. НЕКОТОРЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГИДРООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Согласно уравнению (43) Амбарцумяна,

$$I = \frac{b(\theta) e^{-\kappa r}}{1 + k \cos \theta},$$

интенсивность диффузного излучения меняется с глубиной по экспоненциальному закону, причем показатель ослабления в этом случае в  $k$  раз отличается от показателя ослабления направленного излучения  $\kappa$ . Тогда, обозначая по-прежнему показатель ослабления диффузного потока через  $c$ , имеем:

$$c = k\kappa. \quad (52)$$

Выше уже упоминалось, что параметр  $K$  может быть определен из равенства (44), если известны индикатриса рассеяния и соотношение между рассеянием и общим ослаблением. В связи с тем, что этот параметр играет существенную роль при проведении многих практических расчетов, рассмотрим возможность простого и быстрого определения этой величины через другие оптические характеристики.

Подставим в равенство (24), определяющее показатель вертикального ослабления  $\alpha$ , значения  $S_{z_1}$  и  $S_{z_2}$ , полученные для глубин  $z_1$  и  $z_2$  из первого уравнения системы (48). Заменяя показатель  $q$  равным ему показателем  $c$  (51) и обозначив

$$10^{-(c-c)z_1} = A \text{ и } 10^{-(c-c)z_2} = B,$$

находим:

$$\alpha = c - \frac{1}{z} \lg \left\{ 1 - \frac{n_2 \Phi_0}{S_0} (A + B) \left[ 1 - \frac{n_2}{S_0} (1 - B) + \frac{n_2 \Phi_0}{S_0} (1 - B^2) \right] \right\}. \quad (53)$$

Из этого выражения следует, что показатель вертикального ослабления  $\alpha$  не является величиной постоянной, а с увеличением глубины (величин  $z_1$  и  $z_2$ ) и с возрастанием толщины слоя (величины  $z$ ) приближается к своему граничному значению  $c$ . Показатель  $\alpha$  становится в точности равным показателю ослабления диффузного излучения  $c$  при условии освещения поверхности моря только рассеянным светом или на достаточно больших глубинах, куда не проникает прямое излучение солнца ( $\Phi_0 = 0$ ). Тогда, вместо (52), имеем:

$$\kappa = \frac{\alpha}{c}. \quad (54)$$

Таким образом, по данным одновременных измерений прозрачности морской воды (показатель  $\epsilon$ ) и подводной освещенности (показатель  $\alpha$ ), легко вычисляется коэффициент  $k$ , показывающий во сколько раз ослабление направленного потока превышает ослабление диффузного излучения.

Из равенства (54) отчетливо видно различие между показателями общего ослабления  $\epsilon$  и вертикального ослабления  $\alpha$ . Результаты многочисленных измерений показывают, что для открытых районов океана среднее значение коэффициента  $k$  составляет  $\approx 0,20 - 0,25$ . Физически различие между этими величинами вполне понятно, так как показатель  $\epsilon$  представляет собой сумму показателей поглощения и рассеяния, а показатель  $\alpha$  складывается из показателя поглощения и лишь из доли показателя рассеяния, так как благодаря вытянутости индикатрис рассеяния вперед, в направлении падающих лучей, рассеянный в море свет не является потерянными для освещения нижележащих слоев.

Возвратимся теперь к уравнению (46) Гамбурцева. После несложных преобразований оно принимает следующий вид:

$$\zeta = \frac{\mu/a}{1 + \mu/a + \sqrt{1 + 2\mu/a}}. \quad (55)$$

Полученное равенство позволяет сделать заключение о том, что диффузное отражение моря зависит только от соотношения между рассеянием назад и поглощением и поэтому не должно существенно меняться с глубиной. Этот важный вывод полностью подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Отметим, что радикал, стоящий в правой части уравнения (46) Гамбурцева, согласно равенству (51) представляет собой не что иное, как показатель ослабления диффузного излучения  $s$ . Тогда, вместо (46), получаем

$$\zeta = \frac{a + \mu - s}{\mu}. \quad (56)$$

Решая уравнение (51) относительно  $\mu$  и подставляя его значение в (56), имеем:

$$\zeta = \frac{s - a}{s + a}. \quad (57)$$

Отсюда, полагая в соответствии с (53)  $s = \alpha$ , находим выражение, определяющее показатель поглощения диффузного излучения  $a$  через показатель вертикального ослабления  $\alpha$  и коэффициент диффузного отражения моря  $\zeta$ :

$$a = \frac{\alpha(1 - \zeta)}{1 + \zeta}. \quad (58)$$

Последнее равенство приобретает определенный интерес в связи с тем, что непосредственное экспериментальное определение показателя поглощения сопряжено с большими трудностями.

Учитывая, что диффузное отражение моря в открытых районах весьма невелико (обычно  $\zeta$  не превышает  $0,02 - 0,03$ ), из соотношения (58) следует, что ослабление диффузного потока в море почти полностью определяется истинным поглощением. В то же время, безусловно, определенную роль в этом процессе играет и рассеяние назад. Выше уже было показано (51), что

$$\alpha = \sqrt{a^2 + 2a\mu}, \quad (59)$$

откуда с ошибкой, не превышающей  $0,01$ , так как величина  $\mu^2$  очень мала,

$$\alpha = a + \mu.$$

Таким образом, по данным одновременных измерений прозрачности морской воды (показатель  $\epsilon$ ) и подводной освещенности (показатель  $\alpha$ ), легко вычисляется коэффициент  $k$ , показывающий во сколько раз ослабление направленного потока превышает ослабление диффузного излучения.

Из равенства (54) отчетливо видно различие между показателями общего ослабления  $\epsilon$  и вертикального ослабления  $\alpha$ . Результаты многочисленных измерений показывают, что для открытых районов океана среднее значение коэффициента  $k$  составляет  $\approx 0,20 - 0,25$ . Физически различие между этими величинами вполне понятно, так как показатель  $\epsilon$  представляет собой сумму показателей поглощения и рассеяния, а показатель  $\alpha$  складывается из показателя поглощения и лишь из доли показателя рассеяния, так как благодаря вытянутости индикатрис рассеяния вперед, в направлении падающих лучей, рассеянный в море свет не является потерян для освещения нижележащих слоев.

Возвратимся теперь к уравнению (46) Гамбурцева. После несложных преобразований оно принимает следующий вид:

$$\zeta = \frac{\mu/a}{1 + \mu/a + \sqrt{1 + 2\mu/a}}. \quad (55)$$

Полученное равенство позволяет сделать заключение о том, что диффузное отражение моря зависит только от соотношения между рассеянием назад и поглощением и поэтому не должно существенно меняться с глубиной. Этот важный вывод полностью подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Отметим, что радикал, стоящий в правой части уравнения (46) Гамбурцева, согласно равенству (51) представляет собой не что иное, как показатель ослабления диффузного излучения  $c$ . Тогда, вместо (46), получаем

$$\zeta = \frac{a + \mu - c}{\mu}. \quad (56)$$

Решая уравнение (51) относительно  $\mu$  и подставляя его значение в (56), имеем:

$$\zeta = \frac{c - a}{c + a}. \quad (57)$$

Отсюда, полагая в соответствии с (53)  $c = \alpha$ , находим выражение, определяющее показатель поглощения диффузного излучения  $a$  через показатель вертикального ослабления  $\alpha$  и коэффициент диффузного отражения моря  $\zeta$ :

$$a = \frac{\alpha(1 - \zeta)}{1 + \zeta}. \quad (58)$$

Последнее равенство приобретает определенный интерес в связи с тем, что непосредственное экспериментальное определение показателя поглощения сопряжено с большими трудностями.

Учитывая, что диффузное отражение моря в открытых районах весьма невелико (обычно  $\zeta$  не превышает  $0,02 - 0,03$ ), из соотношения (58) следует, что ослабление диффузного потока в море почти полностью определяется истинным поглощением. В то же время, безусловно, определенную роль в этом процессе играет и рассеяние назад. Выше уже было показано (51), что

$$\alpha = \sqrt{a^2 + 2a\mu}, \quad (59)$$

откуда с ошибкой, не превышающей  $0,01$ , так как величина  $\mu^2$  очень мала,

$$\alpha \approx a + \mu.$$

Пользуясь соотношениями (30) и (58), легко найти показатель рассеяния диффузного излучения  $b$ :

$$b = \frac{2\alpha\zeta}{1+\zeta}, \quad (60)$$

а также его компоненты (31) — показатели рассеяния вперед  $\xi$  и назад  $\mu$ . Решая преобразованное уравнение Гамбурцева (56) относительно  $\mu$  и подставляя в него значение  $a$  из (58), находим:

$$\mu = \frac{2\alpha\zeta}{1-\zeta^2}. \quad (61)$$

Показатель рассеяния диффузного излучения вперед  $\xi$  оказывается очень близким к нулю. Действительно, так как  $\alpha = a + b$  (30) и, в свою очередь,  $b = \xi + \mu$  (31), то  $\alpha = a + \mu + \xi$ . Вместе с тем мы видели, что  $\alpha = a + \mu$ . Таким образом, в первом приближении, как это и следует из равенства (60), ослабление распространяющегося в море диффузного потока определяется только рассеянием назад и истинным поглощением.

Полученные равенства позволяют вычислять значения целого ряда оптических характеристик через легко определяемые из измерений величины показателей вертикального ослабления  $\alpha$  и коэффициента диффузного отражения моря  $\zeta$ . Пользуясь данными одновременных измерений ослабления потока естественного света и элементов ослабления направленного потока (прозрачности морской воды и ее индикатрис рассеяния), можно получать все необходимые величины для расчета характеристик светового режима моря. Эти же расчеты с успехом могут быть применены для определения характеристик потоков излучения, идущих в море в направлении прожекторного луча и обратно. Такие расчеты имеют несомненный интерес при решении задач, связанных с освещением при аварийно-спасательных работах, с определением видимости подводных объектов, с обеспечением работы подводной телевизионной аппаратуры, с определением оптимальных условий производства аэрофотосъемки на море и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Амбарцумян В. А. К вопросу о диффузном отражении света мутной среды. ДАН СССР, 1943, т. 37, № 8.  
 Амбарцумян В. А. Новый способ расчета рассеяния света в мутной среде. «Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз.», 1944, № 3.  
 Гамбурцев А. Г. К вопросу о цветности моря. М., 1924.  
 Гершуни А. А. Избранные труды по фотометрии и фототехнике. М., 1958.  
 Сена Л. А. Единицы измерения физических величин. Гостехиздат, 1948.  
 Joseph J. Untersuchungen über Ober- und Unterlichtmessungen im Meere und über ihrem Zusammenhang mit Durchsichtigkeitmessungen. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, B. 3, 1950.

М. В. Козлянинов

ГИДРООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
И МЕТОДИКА ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под гидрооптическими характеристиками понимаются физико-химические и биологические характеристики вод океанов, морей, озер и других водных бассейнов, определяющие условия распространения в них света. При этом под понятием «свет» подразумевается электромагнитное излучение, сосредоточенное в так называемом оптическом участке спектра, т. е. излучение, заключенное в интервале длин волн от  $\lambda = 0,01$  до  $\lambda = 3,40$  м. Оптический участок спектра, следовательно, значительно шире его видимой части, лежащей в пределах от  $\lambda = 0,4$  до  $\lambda = 0,8$  м. Таким образом, гидрооптические характеристики определяют условия распространения в воде как видимых лучей, так и невидимого человеческого глазом излучения, принадлежащего к ультрафиолетовой и инфракрасной частям спектра. Необходимость исследования условий распространения этих лучей объясняется тем, что при решении различного рода задач приходится встречаться с воздействием поля излучения не только на человеческий глаз, но и на разнообразные растительные и животные организмы, фотопластинки, фотоэлементы, пиранометры и др. Кроме того, как известно, инфракрасное излучение играет весьма существенную роль в теплообмене между океаном и атмосферой.

В гидрофотометрии до сих пор отсутствует строгое разграничение понятий и не выработано достаточно четкой и ясной терминологии. Одни и те же величины часто называются по-разному и, наоборот, под одними и теми же терминами иногда понимаются разные физические величины. Это касается как нашей отечественной, так и иностранной и, особенно, переводной литературы. В результате разные авторы не всегда понимают один другого, поэтому часто возникают ошибки, а иногда и просто заблуждения.

Прежде всего, приведем определения основных гидрооптических характеристик с указанием их размерности и единиц, в которых они измеряются. Там, где только это возможно, определения и обозначения основываются на разработанном в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова Государственном стандарте («ГОСТ 7604-55. Физическая оптика. Обозначения основных величин»), введенном в действие в 1956 г.

Можно надеяться, что помещение такого перечня (насколько известно, до сих пор его в литературе не приводилось) послужит делу унификации и стандартизации в области гидрофотометрии и тем самым поможет устранить отмеченные выше неопределенность понятий и нечеткость терминологии.

Теоретические основы гидрооптики, краеугольным камнем которых является проблема рассеяния излучения в мутных средах, разработаны



4

весьма глубоко. Труды Хвольсона, Ми, Гершуна, Гамбургера, Шулейкина, Фока, Иозефа и особенно последние работы Амбарцумяна и возглавляемой им школы советских астрофизиков весьма полно раскрывают очень сложные закономерности оптических процессов, протекающих в водах различных бассейнов. Далеко не так обстоит дело с методикой и техникой гидрофотометрических измерений и, как следствие этого, с нашими сведениями о гидрооптических характеристиках водных масс океанов и различных морей. Отсутствие стандартной измерительной аппаратуры и недостаточная разработка методики наблюдений с имеющимися уникальными и опытными образцами приборов приводят к тому, что эти наблюдения часто ведутся грубо и примитивно с заметным отставанием техники измерений от современных возможностей.

При развертывании работ в области гидрооптики в Институте океанологии АН СССР было учтено, что первоочередной задачей в этом направлении является совершенствование существующих и разработка новых методов гидрофотометрических исследований. Естественно, что первым шагом на этом пути должно было быть создание стандартной измерительной аппаратуры, основанной на использовании современных технических средств, в частности, средств электронной и полупроводниковой техники.

Основываясь на данных испытаний и эксплуатации опытных образцов приборов, сконструированных в течение последних лет в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова (ГОИ), Институте океанологии АН СССР (ИОАН) совместно с ГОИ и др., были разработаны технические условия для проектирования и изготовления комплекта стандартной гидрооптической аппаратуры, состоящего из четырех приборов и размещен заказ на их изготовление. Кроме того, для обеспечения возможности выполнения наблюдений на ходу судна и для специальных измерений очень малых освещенностей на больших глубинах в ИОАНе были разработаны и изготовлены опытные образцы еще двух гидрооптических приборов. В этой статье после перечня гидрооптических характеристик и изложения некоторых основных теоретических предпосылок, необходимых для обоснования тех или иных методов измерений, и для исследования зависимостей между различными оптическими характеристиками, приводится краткое описание новой гидрооптической аппаратуры и рассматриваются основные вопросы методики современных гидрофотометрических измерений. Изложение методических вопросов основывается как на литературных данных, так и в значительной мере на разработках, выполненных во время экспедиционных и экспериментальных работ на э/с «Витязь» и на Черноморской экспериментальной научно-исследовательской станции Института.

Статья заканчивается исследованием зависимостей между различными гидрооптическими характеристиками, рассмотрение которых приобретает вполне определенный интерес в связи с тем, что непосредственное измерение ряда этих характеристик весьма трудоемко и требует применения специальной аппаратуры. Основываясь на таких зависимостях, полученных теоретически или найденных экспериментально, при работах в море можно ограничиться минимальным числом измерений. Вполне понятно, что знание этих зависимостей также совершенно необходимо для получения правильных представлений об оптических процессах, протекающих в море. Эмпирические связи между глубиной видимости белого стандартного диска и некоторыми основными оптическими характеристиками здесь не затрагиваются, так как будут рассмотрены в специальной работе, посвященной этим объектам.



### 1. ОСНОВНЫЕ ГИДРООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Прежде чем приступить к определениям гидрооптических характеристик, отметим, что в гидрофотометрии значительно удобнее пользоваться не светотехническими, а энергетическими величинами (Сена, 1949), т. е. оперировать не понятиями «световой поток», «яркость», «освещенность» и т. д., а понятиями «лучистый поток», «энергетическая яркость», «энергетическая освещенность» и т. д. Выше уже упоминалось, что в гидрооптике исследуется не только видимое, но и ультрафиолетовое и инфракрасное излучения и при решении ряда задач можно встретиться с действием поля излучения на самые различные приемники радиации, кривые спектральной чувствительности которых могут весьма существенно отличаться от кривой спектральной чувствительности человеческого глаза. Энергетические величины, как известно, совершенно свободны от каких бы то ни было физиологических особенностей зрения, в то время как светотехнические зависят от них. В случае необходимости переход от энергетических величин к светотехническим осуществляется весьма просто. Для этого необходимо только знать так называемую относительную видность  $v$  интересующего нас приемника излучения, т. е. вид функции  $v = f(\lambda)$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения. В дальнейшем под терминами поток, яркость, сила света, освещенность и т. д. всюду понимаются энергетические величины.

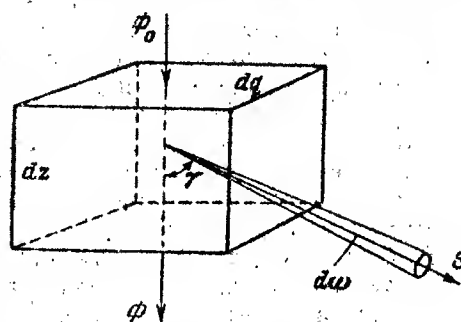


Рис. 1. Схема определения показателей поглощения, рассеяния и ослабления света в морской воде

Выделим в море бесконечно малый объем  $dv = dq \cdot dz$  (рис. 1). Пусть на верхнюю грань  $dq$  этого объема отвесно падает поток монохроматических лучей, расхождением которых в пределах элементарного объема можно пренебречь. Обозначим поток излучения, падающий на грань, через  $\Phi_0$ , а создаваемую им освещенность через  $E$ .

При прохождении потока  $\Phi_0$  через объем  $dv$  часть его  $d\Phi_{0\alpha}$  будет поглощена, а часть —  $d\Phi_{0\sigma}$  — рассеяна. Количество поглощенной и рассеянной морской водой энергии излучения определяется соответственно значениями ее показателей поглощения и рассеяния, которые принадлежат к числу наиболее важных гидрооптических характеристик.

Показателем поглощения морской воды называется величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения в 10 раз. Показатель поглощения также может быть определен как величина, равная отношению потока излучения, образующего параллельный пучок и поглощенного единичным объемом морской воды, к освещенности, создаваемой этим потоком на перпендикулярной к нему плоскости:

$$\kappa = -M \frac{d\Phi_{0\alpha}}{\Phi_0 dz} = -M \frac{d\Phi_{0\alpha}}{E dv}, \quad (1)$$

где  $M = 0,4343 \dots$  — модуль десятичных логарифмов.

Показателем рассеяния морской воды называется величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения,

образующего параллельный пучок, ослабляется в результате рассеяния в 10 раз. Показатель рассеяния также может быть определен как величина, равная отношению потока излучения, образующего параллельный пучок, к рассеянному единичным объемом морской воды, к освещенности, создаваемой этим потоком на перпендикулярной к нему плоскости:

$$\sigma = -M \frac{d\Phi_0 \sigma}{\Phi_0 dz} = -M \frac{d\Phi_0 \sigma}{E dv}. \quad (2)$$

Из определений следует, что размерность показателей поглощения и рассеяния обратна размерности длины, т. е.  $[\kappa] = [L^{-1}]$  и  $[\sigma] = [L^{-1}]$ . В гидрооптике эти показатели обычно измеряются в обратных метрах.

В результате совокупного действия процессов поглощения и рассеяния поток излучения  $\Phi_0$ , вошедший в объем  $dv$ , испытывает общее ослабление, т. е. часть его  $-d\Phi_0 \epsilon = d\Phi_0 \kappa + d\Phi_0 \sigma$  не пойдет в первоначальном направлении. Суммарное количество поглощенной и рассеянной в воде энергии излучения определяется значением показателя ослабления, который также является одной из важнейших оптических характеристик морской воды.

Показателем ослабления  $\epsilon$  морской воды называется величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате совместного действия поглощения и рассеяния в 10 раз. Показатель ослабления также может быть определен как величина, равная отношению потока излучения, образующего параллельный пучок и ослабленного в результате поглощения и рассеяния единичным объемом морской воды, к освещенности, создаваемой этим объемом на перпендикулярной к нему плоскости:

$$\epsilon = -M \frac{d\Phi_0 \epsilon}{\Phi_0 dz} = -M \frac{d\Phi_0 \epsilon}{E dv}. \quad (3)$$

Очевидно, что

$$\epsilon = \kappa + \sigma. \quad (4)$$

Размерность показателя ослабления такова же, как и размерность показателей поглощения и рассеяния, т. е.  $[\epsilon] = [L^{-1}]$ . Как и показатели  $\kappa$  и  $\sigma$ , показатель  $\epsilon$  измеряется в обратных метрах.

В отечественной, а также и в иностранной литературе часто пользуются показателями поглощения, рассеяния и ослабления, определяемыми по ослаблению света не в 10, а в  $e$  раз (где  $e$  — основание натуральных логарифмов). В этом случае эти величины называются натуральными показателями поглощения  $\kappa'$ , рассеяния  $\sigma'$  и ослабления  $\epsilon'$ . Очевидно, что

$$\kappa = M\kappa', \quad \sigma = M\sigma' \quad \text{и} \quad \epsilon = M\epsilon'. \quad (5)$$

Согласно уравнению переноса излучения, поток монохроматических лучей, прошедший в однородной воде без изменения направления некоторый путь  $dz$  (рис. 1), определяется из соотношения:

$$-d\Phi = \epsilon' \Phi dz.$$

Интегрирование этого уравнения дает хорошо известный показательный закон ослабления Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon' z}. \quad (6)$$

Равенство (6) позволяет определить еще две весьма важные оптические характеристики воды — прозрачность и коэффициент пропускания. Последний, в свою очередь, однозначно определяет оптическую плотность.

Коэффициентом пропускания  $T$  морской воды называется отношение потока излучения, прошедшего некоторым слоем воды, к потоку излучения, упавшему на этот слой:

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-\epsilon' z} = 10^{-\epsilon z}. \quad (7)$$

Величина  $\epsilon' z$  называется оптической глубиной  $\tau$ .

Из равенств (7) очевидно, что коэффициент пропускания  $T$  является величиной безразмерной.

Десятичный логарифм величины, обратной коэффициенту пропускания, называется оптической плотностью  $D$ :

$$D = \lg \frac{1}{T}. \quad (8)$$

Прозрачностью  $\theta$  морской воды называется отношение потока излучения, прошедшего в ней без изменения направления пути, равный единице к потоку излучения, вошедшему в воду в виде параллельного пучка. Иначе говоря, прозрачностью морской воды называется ее коэффициент пропускания для однородного слоя единичной толщины. Из равенств (7) следует, что

$$\theta = e^{-\epsilon'} = 10^{-\epsilon}. \quad (9)$$

Прозрачность  $\theta$  — величина безразмерная.

Для значений величин  $T$  и  $\theta$  всегда соблюдается условие:

$$0 \leq T \leq 1 \text{ и } 0 \leq \theta \leq 1.$$

Из формулы (9) следует, что показатель ослабления численно равен абсолютному значению десятичного логарифма прозрачности:

$$\epsilon = |\lg \theta|. \quad (10)$$

Таким образом, величины  $\epsilon$  и  $\theta$  однозначно определяют друг друга.

Если элементарный объем воды  $dv$  (см. рис. 1), освещаемый потоком излучения  $\Phi_0$ , рассматривать с некоторого расстояния в направлении  $S$ , составляющем угол  $\gamma$  с направлением падающих лучей, то, вследствие явления рассеяния, этот объем будет светиться как источник излучения, имеющий в этом направлении энергетическую силу света:

$$dI = \frac{1}{4\pi} \sigma(\gamma) E dv = \beta' \frac{E}{\pi} dv. \quad (11)$$

где  $\sigma'(\gamma)$  — натуральный показатель рассеяния в данном направлении (Гершун, 1958). Через  $\beta'$  в этом равенстве обозначен натуральный показатель яркости морской воды, а через  $E$  — по-прежнему освещенность верхней грани объема. Как известно, яркость  $B_0$  идеально белой поверхности<sup>1</sup>, перпендикулярной направлению освещения, определяется как

$$B_0 = \frac{E}{\pi}.$$

<sup>1</sup> Здесь и в дальнейшем под идеально белой матовой поверхностью понимается диффузно отражающая, непрозрачная и не поглощающая поверхность.

Подставляя выражение для  $B_0$  в (11), получаем равенство, дающее возможность определить еще одну важную гидрооптическую характеристику — показатель яркости воды.

Показателем яркости  $\beta'$  морской воды называется отношение силы света, рассеянного в данном направлении единицей объема воды, к яркости идеально белой матовой поверхности, перпендикулярной направлению лучей, освещающих рассматриваемый объем:

$$\beta' = \frac{dI}{B_0 d\Omega} \quad (12)$$

Из этого равенства следует, что размерность показателя яркости обратна размерности длины  $[\beta'] = [L^{-1}]$ . Показатель яркости обычно измеряется в обратных метрах.

Если из центра рассеивающего объема отложить векторы, равные по величине показателю яркости  $\beta'$ , то поверхность, огибающая концы этих векторов, будет представлять пространственное распределение энергии рассеянного света вокруг рассматриваемого объема. Такая поверхность носит название индикатрисы показателя яркости  $\beta'(\gamma)$ . Для неполяризованного света эта поверхность симметрична относительно любой плоскости, проходящей через направление падающих лучей. Поэтому индикатрису показателя яркости можно представлять плоской кривой, характеризующей распределение энергии рассеянного света в зависимости от угла рассеяния. Полную характеристику условий рассеяния неполяризованного света в морской воде будут давать спектральные индикатрисы показателя яркости  $\beta'(\gamma, \lambda)$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения.

Общий поток, рассеянный элементарным объемом  $dv$  по всем направлениям, определится как

$$\Phi_0 \sigma = \int_{4\pi} I d\omega, \quad (13)$$

где  $d\omega$  — элементарный телесный угол, ось которого составляет угол  $\gamma$  с направлением падающих лучей.

Из уравнений (2) и (13), с учетом (11), следует, что показатель рассеяния  $\sigma$  равен

$$\sigma = \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} \beta(\gamma) d\omega = \frac{M}{\pi} \int_{4\pi} \beta'(\gamma) d\omega, \quad (14)$$

где  $M$  — по-прежнему модуль десятичных логарифмов.

Так как

$$\int_{4\pi} d\omega = 2\pi \int_0^\pi \sin \gamma d\gamma, \quad (15)$$

то вместо (14), получаем окончательно соотношение, которое служит для расчета показателя рассеяния  $\sigma$  по измеренным значениям  $\beta'(\gamma)$ :

$$\sigma = 2M \int_0^\pi \beta'(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (16)$$

Как в теоретических работах, так и при обработке результатов измерений и при производстве различных расчетов часто пользуются не индикатрисой показателя яркости, а индикатрисой рассеяния  $x(\gamma)$ . Если вероятность рассеяния излучения внутри телесного угла  $d\omega$  обозначить через  $x(\gamma) \frac{d\omega}{4\pi}$ ,

то имеем очевидное условие:

$$\int_{4\pi} x(\gamma) \frac{d\omega}{4\pi} = 1,$$

или, принимая во внимание (15):

$$\frac{1}{2} \int_0^{\pi} x(\gamma) \sin \gamma d\gamma = 1. \quad (17)$$

Из равенств (16) и (17) следует, что

$$x(\gamma) = \frac{4M\beta'(\gamma)}{\sigma} = \frac{4\beta(\gamma)}{\sigma}. \quad (18)$$

Если через центр рассеивающего объема провести плоскость, перпендикулярную падающим лучам, то потоки рассеянного излучения, распространяющиеся по обе стороны от этой плоскости, значительно различаются между собой. Только для чисто молекулярного рассеяния, обусловленного флуктуациями плотности, эти потоки одинаковы, что соответствует сферической форме индикатрисы рассеяния (так называемой индикатрисе Релея). Индикатрисы рассеяния даже для очень чистых океанических вод сильно вытянуты вперед, т. е. в направлении падающих лучей и имеют выпуклую форму. Различие в потоках рассеянного излучения, отбрасываемых вперед и назад от только что упомянутой пограничной плоскости (или, иначе говоря, асимметрия индикатрисы рассеяния), в значительной мере определяет условия распространения света в море. Поэтому возникает необходимость в получении количественных характеристик, определяющих различие в этих потоках. Такими характеристиками являются показатели рассеяния вперед и назад.

Показателем рассеяния вперед  $\delta$  называется компонент показателя рассеяния, определяющий долю потока рассеянного излучения, распространяющегося в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого совпадает с направлением падающих лучей:

$$\delta = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (19)$$

Показателем рассеяния назад  $\phi$  называется компонент показателя рассеяния, определяющий долю потока рассеянного излучения, распространяющегося в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого противоположна направлению падающих лучей:

$$\phi = 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma. \quad (20)$$

Очевидно, что показатель рассеяния  $\sigma$  равен сумме этих показателей, т. е.

$$\sigma = \delta + \phi. \quad (21)$$

Часто оказывается существенным знать, какая часть всего рассеянного излучения сосредоточена в конусе, ограниченном углами  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , т. е. какое значение функции

$$f(\gamma) = \frac{\int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma}{\int_0^{\gamma_2} \beta(\gamma) \sin \gamma d\gamma}. \quad (22)$$

Необходимо подчеркнуть, что равенства (3) и (10), послужившие для определения показателя ослабления, а также равенство (6), выражающее закон Бугера, справедливы только для направленного, монохроматического излучения, распространяющегося в однородной среде. В то же время практически очень часто приходится иметь дело с распространением в море дневного света, являющегося не только немонахроматическим (сложным), но и смешанным (направленным и диффузным) излучением. Поэтому в гидрооптику было введено понятие о показателе вертикального ослабления, характеризующем изменение естественного света с глубиной. Многочисленные эксперименты, выполненные в разное время разными авторами, с полным согласием показывают, что в первом приближении дневной свет в море ослабляется с глубиной по показательному закону:

$$S_{z_2} = S_{z_1} 10^{-\alpha z}, \quad (23)$$

где  $S_{z_1}$  — поток немонахроматического смешанного излучения на глубине  $z_1$ ;  $S_{z_2}$  — поток того же излучения на глубине  $z_2$ ;  $z = z_2 - z_1$  — толщина водного слоя.

Показателем вертикального ослабления  $\alpha$  называется величина; обратная расстоянию, на котором поток естественного света ослабляется в результате совместного действия поглощения и рассеяния в 10 раз. Согласно равенству (23) показатель вертикального ослабления может быть также определен как разность логарифмов потоков естественного света на верхней и нижней границах водного слоя, отнесенная к его толщине:

$$\alpha = \frac{\lg S_{z_1} - \lg S_{z_2}}{z} = \frac{1}{z} \lg \frac{S_{z_1}}{S_{z_2}}. \quad (24)$$

Аналогично понятию о натуральном показателе ослабления  $\epsilon'$  может быть введено понятие и о натуральном показателе вертикального ослабления  $\alpha'$ :

$$\alpha = M\alpha'.$$

Из равенства (24) следует, что размерность показателя вертикального ослабления обратна размерности длины:  $[\alpha] = [L^{-1}]$ . Так же как и показатель  $\epsilon$ , показатель  $\alpha$  обычно измеряется в обратных метрах.

Изменение с глубиной распространяющегося в море потока дневного света удобно характеризовать коэффициентом подводной освещенности  $\eta$ , под которым понимается отношение освещенности  $E_z$  некоторой плоскости, находящейся в море на глубине  $z$ , к одномерному значению подповерхностной освещенности  $E_{0\text{п}}$ . Последняя величина представляет собой освещенность горизонтальной плоскости, расположенной непосредственно под поверхностью моря и освещаемой таким образом потоком естественного света, уже претерпевшим отражение и

преломление на этой поверхности. Тогда

$$\eta = \frac{E_z}{E_{\text{оп}}} \quad (25)$$

В большинстве случаев рассматривается освещенность сверху  $E_z$  и снизу  $E'_z$  горизонтальных поверхностей, расположенных в море на различных глубинах. График функции  $\eta = \eta(z)$  дает наглядное представление о характере вертикального распределения освещенности, создаваемой естественным светом.

К числу весьма важных гидрооптических характеристик принадлежат коэффициенты диффузного отражения и яркости моря.

Коэффициентом диффузного отражения моря  $\zeta$  называется отношение потока диффузного излучения  $R_z$ , идущего на глубине  $z$  к поверхности моря, к потоку естественного излучения  $S_z$ , идущего на той же глубине вертикально вниз, в глубь моря:

$$\zeta = \frac{R_z}{S_z} \quad (26)$$

Коэффициентом яркости моря  $\rho_{\theta, \varphi}$  называется отношение яркости диффузного излучения  $B_{\theta, \varphi}$ , идущего из толщи моря непосредственно под его поверхностью в направлении, определяемом углами  $\theta$  и  $\varphi$  (где  $\theta$  — зенитное расстояние, а  $\varphi$  — азимут), к яркости  $B_0$  идеально белой матовой поверхности, освещенной естественным светом:

$$\rho_{\theta, \varphi} = \frac{B_{\theta, \varphi}}{B_0} = \frac{\pi E_{\theta, \varphi}}{E_0} \quad (27)$$

где  $E_0$  — освещенность поверхности моря.

Зависимость коэффициента яркости моря от длины волны излучения  $\lambda$  характеризует распределение энергии в спектре излучения, выходящего из толщи моря и, следовательно, определяет его собственный цвет<sup>1</sup>.

Из определений следует, что коэффициенты  $\eta$ ,  $\zeta$  и  $\rho$  — величины безразмерные.

При рассеянии свет частично поляризуется. В связи с этим для решения некоторых задач возникает необходимость в получении характеристик поляризации света в морской воде. К основным из них относятся степень поляризации  $P$  и степень деполаризации  $Q$ .

Степенью поляризации  $P$  называется отношение максимальной разности потоков двух взаимно перпендикулярно поляризованных составляющих, на которые может быть разложено данное частично поляризованное излучение, к сумме этих потоков:

$$P = \frac{\Phi_- - \Phi_+}{\Phi_- + \Phi_+} \quad (28)$$

где  $\Phi_-$  — поток частично поляризованного излучения, электрический вектор которого лежит в плоскости рассеяния, а  $\Phi_+$  — поток того же излучения, электрический вектор которого перпендикулярен этой плоскости.

<sup>1</sup> В отличие от видимого цвета моря, который зависит от состояния его поверхности, облачности и угла зрения наблюдателя, собственный цвет моря определяется только физико-химическими характеристиками воды в том или ином районе, и поэтому именно он может и должен интересовать океанолога, гидрографа, мореплавателя и т. д.



Величина

$$Q = \frac{1-P}{1+P} \quad (29)$$

носит название степени деполаризации.

Далеко не всегда учитывается, что показатели ослабления, поглощения и рассеяния для направленного излучения по своим значениям сильно отличаются от этих же показателей для диффузного излучения. Однако это различие часто не находит отражения в специальной литературе. Определим эти характеристики следующим образом.

Показатель поглощения диффузного излучения  $a$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток полностью рассеянного излучения ослабляется в результате поглощения в 10 раз.

Показатель рассеяния диффузного излучения  $b$  — величина, обратная расстоянию, на котором поток полностью рассеянного излучения ослабляется в результате многократного рассеяния в 10 раз.

Выше были даны определения показателей рассеяния вперед  $\delta$  и назад  $\phi$  для направленного излучения. Для рассмотрения наиболее часто встречающегося в практике случая распространения света от поверхности в глубь моря и в обратном направлении введем такие же понятия и для диффузного излучения.

Показателем рассеяния диффузного излучения вперед  $\xi$  будем называть компоненту показателя рассеяния  $b$ , определяющую долю потока полностью рассеянного излучения, распространяющегося в море в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого направлена вертикально вниз, в глубь моря.

Показателем рассеяния диффузного излучения назад  $\mu$  будем называть компоненту показателя рассеяния  $b$ , определяющую долю потока полностью рассеянного излучения, распространяющегося в море в пределах телесного угла  $2\pi$  стерадиан, ось которого направлена вертикально вверх, к поверхности моря.

Показателем ослабления диффузного излучения  $c$  называется величина, обратная расстоянию, на котором поток полностью рассеянного излучения ослабляется в результате совместного действия поглощения и рассеяния в 10 раз.

Очевидно, что

$$c = a + b, \quad (30)$$

$$b = \xi + \mu. \quad (31)$$

Как и прежде, будем обозначать натуральные показатели поглощения, рассеяния и ослабления через  $a'$ ,  $b'$  и  $c'$ , причем  $a = 0,43 a'$ ;  $b = 0,43 b'$ ;  $c = 0,43 c'$ .

В заключение этого раздела отметим, что аналогично принятому в метеорологии и, в частности, в оптике атмосферы, понятию оптической дальности видимости в гидрооптике применяется понятие глубины видимости.

Под глубиной видимости  $H$  какого-либо объекта понимается то предельное расстояние, на котором этот объект, геометрически доступный наблюдению, виден при данных условиях освещения и данных оптических характеристиках морской воды.

В океанологии самым широкое распространение наблюдения над «прозрачностью» и «цветом» морской воды. При этом под прозрачностью понимается глубина видимости погруженного в море белого стандартного ди-

ска, выраженная в метрах. Совершенно очевидно, что эта величина совсем не равноценна прозрачности морской воды  $\theta$  в обычном физическом смысле, определяемой равенством (9). Поэтому в дальнейшем, во избежание неточностей, результаты измерений по диску будут именоваться *глубиной видимости диска*, или *относительной прозрачностью  $h$* . Под цветом морской воды  $C$  понимается номер раствора стандартной шкалы цветности, окраска которого наиболее близка к цвету столба воды над диском в месте наблюдений.

## 2. НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В МОРЕ

Не вдаваясь в детальное рассмотрение сложных закономерностей распространения излучения в море, безусловно выходящее за рамки настоящей работы, остановимся только на некоторых основных теоретических положениях, необходимых для выбора и обоснования тех или иных методов измерений гидрооптических характеристик и рассмотрения зависимостей между ними. Для этой цели воспользуемся исследованиями В. А. Амбарцумяна (1943, 1944), А. Г. Гамбурцева (1924) и И. Иорзефа (1950).

Вопрос о расчете светового режима моря сводится к решению уравнения распространения излучения в поглощающей и рассеивающей среде, т. е. к решению так называемого уравнения переноса излучения, которое может быть записано в следующей общей форме:

$$\frac{dJ}{dt} = -\epsilon'J + i. \quad (32)$$

Через  $J$  обозначена интенсивность излучения, распространяющегося в среде в направлении  $l$ ; через  $i$  — коэффициент излучения, а через  $\epsilon'$  — натуральный показатель ослабления. В задачах гидрооптики можно пренебрегать собственным излучением моря и считать, что излучательная способность морской воды равна ее рассеивающей способности. Тогда коэффициент  $i$  будет выражать количество энергии, рассеянное единицей объема воды в единице телесного угла, ось которого составляет угол  $\gamma$  с направлением падающих лучей:

$$i = \frac{\sigma}{4\pi} \int x(\gamma) J d\omega. \quad (33)$$

Это уравнение носит название уравнения лучевого равновесия.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай — ослабление направленного потока (например прямых солнечных лучей), распространяющегося вертикально в глубь моря в направлении оси  $z$ . Уравнение переноса излучения запишется в простой форме:

$$\frac{dJ}{dz} = -\epsilon'J. \quad (34)$$

Интегрируя это уравнение и переходя от интенсивности излучения к потоку, получим уже упоминавшийся выше закон Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon'z}. \quad (35)$$

Из простых геометрических соображений следует, что если солнечные лучи падают на поверхность моря не отвесно, а под некоторым углом  $\theta$ , где  $\theta$  — зенитное расстояние солнца, то в случае гладкой поверхности моря поток направленного излучения  $\Phi$ , достигший глубины

$z$ , будет составлять:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon' z \sec \theta'} \quad (36)$$

где, в свою очередь,  $\theta'$  — угол преломления солнечных лучей, связанный с зенитным расстоянием солнца простым соотношением:

$$\sin \theta' = \frac{1}{n} \sin \theta. \quad (37)$$

Здесь через  $n$  обозначен показатель преломления морской воды.

Положив в показателе степени при  $e$  в формуле (36)  $\epsilon'_1 = \epsilon' \sec \theta'$ , что соответствует формальной замене увеличения пути направленного излучения увеличением значения показателя ослабления, закон Бугера можно записать в следующем виде:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\epsilon'_1 z}. \quad (38)$$

Выше уже упоминалось, что закон Бугера в такой форме справедлив только для направленного монохроматического излучения, распространяющегося в однородной среде. При неоднородной среде, но монохроматическом излучении, вместо (35), имеем:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\int_0^z \epsilon' dz}. \quad (39)$$

Если в море распространяется поток немонахроматического, но направленного излучения (например поток прямых солнечных лучей), то даже в этом сравнительно простом случае изменение с глубиной рассматриваемого потока не может быть выражено простым законом ослабления, так как показатель  $\epsilon'$  становится зависящим от распределения энергии в спектре излучения. В свою очередь, это распределение непрерывно меняется с глубиной вследствие селективности процессов поглощения и рассеяния. Поэтому даже в случае однородной среды показатель  $\epsilon'$  будет являться функцией не только длины волны  $\lambda$ , но и глубины  $z$ , т. е.  $\epsilon' = \epsilon'(\lambda, z)$ . Введем понятие о некотором среднем значении показателя  $\epsilon'$  для потока излучения, заключенного в интервале длин волн  $(\lambda_1, \lambda_2)$  и распространяющегося от поверхности моря до глубины  $z$ . В силу закона спектральной аддитивности поток немонахроматического излучения  $\Phi_z$  на глубине  $z$  может быть представлен как

$$\Phi_z = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda,z} d\lambda, \quad (40)$$

где  $\Phi_{\lambda,z}$  — поток монохроматического излучения, заключенного в интервале длин волн  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$  на глубине  $z$ .

Среднее значение  $\bar{\epsilon}'$  находится из равенства (35):

$$\bar{\epsilon}' = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon'_{\lambda} \Phi_{\lambda,z} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda,z} d\lambda}. \quad (41)$$

где  $\epsilon_{\lambda}$  — показатель ослабления монохроматического излучения в интервале длин волн  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ .

Тогда закон ослабления потока монохроматического, но направленного излучения принимает вид:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\int_0^z \bar{\epsilon}' dz} \quad (42)$$

Для случая распространения в среде только диффузного излучения, идущего под углом  $\theta$  к вертикали, В. А. Амбарцумян (1943) находит решение уравнения переноса излучения в виде:

$$J = \frac{b(\theta) e^{-k\tau}}{1 + k \cos \theta} \quad (43)$$

где  $\tau$  — оптическая глубина,  $b(\theta)$  — некоторая функция, зависящая от углового распределения энергии излучения,  $k$  — параметр, зависящий от индикатрисы рассеяния и от соотношения между рассеянием и общим ослаблением.

Для преимущественно рассеивающих сред параметр  $k$  определяется как

$$k = \sqrt{(1-s)(3-x_1)} \quad (44)$$

где  $s$  — доля рассеяния в общем ослаблении, т. е.  $s = \frac{\sigma}{\epsilon}$ , а  $x_1$  — первый коэффициент в разложении индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра:

$$x_1 = \frac{3}{2} \int_0^\pi x(\gamma) \cos \gamma \sin \gamma d\gamma.$$

Основные закономерности наиболее общего случая — распространения в море смешанного, т. е. одновременно направленного и диффузного излучения (например, естественного света при солнце, не закрытом облаками), рассмотрим, базируясь на теоретических разработках А. Г. Гамбурцева (1924) и Иозефа (Joseph, 1950). При этом ограничимся случаем, когда море достаточно глубоко, т. е. когда отражение от дна не влияет на интенсивность распространяющегося в море излучения. Такое предположение вполне допустимо, так как уже на расстоянии, равном глубине видимости диска, альбедо дна практически не сказывается.

Для исследования закономерностей изменения потока излучения  $S$ , близкого к диффузному, идущего в глубь моря и потока  $R$ , распространяющегося в море вертикально вверх к его поверхности, Гамбурцев составляет следующие уравнения, представляющие собой уравнения переноса излучения, записанные в развернутом виде (в наших обозначениях):

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dz} &= -aS - \mu S + \mu R \\ -\frac{dR}{dz} &= -aR - \mu R + \mu S \end{aligned} \quad (45)$$

Гамбурцев решает эти уравнения совместно относительно величин  $\frac{R}{S}$ , которая, согласно определению (26), представляет собой коэффициент диффузного отражения моря  $\zeta$ . Решение находится в виде:

$$\zeta = \frac{R}{S} = \frac{a + \mu - \sqrt{a^2 + 2a\mu}}{\mu} \quad (46)$$

Напомним, что через  $a$  обозначен показатель поглощения, а через  $\mu$  — показатель рассеяния назад для диффузного излучения.

Рассмотрим теперь распространение в море одновременно и направленного и диффузного излучений. Выделим на глубине  $z$  из общего потока излучения  $S$  его компоненту  $F$ , представляющую собой чисто диффузный поток и обозначим по-прежнему направленный поток через  $\Phi$ . В этом случае система уравнений (45) Гамбурцева должна быть дополнена членами  $\delta\Phi$  и  $\psi\Phi$ , учитывающими изменение потоков  $F$  и  $R$  за счет добавления компонентов рассеянного вперед (показатель  $\delta$ ) и назад (показатель  $\psi$ ) излучения направленного потока  $\Phi$ . Тогда, вместо уравнения (45), имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dz} &= -aF - \mu F + \mu R + \delta\Phi \\ -\frac{dR}{dz} &= -aR - \mu R + \mu F + \psi\Phi \\ \frac{d\Phi}{dz} &= -\varepsilon\Phi = -(\kappa + \sigma)\Phi. \end{aligned} \quad (47)$$

Третье уравнение этой системы представляет собой не раз уже упоминавшееся выше уравнение переноса излучения для направленного потока (34). Введем такие же граничные условия, как и при интегрировании уравнения (34), т. е. положим, что

$$\Phi_{(0)} = \Phi_0, F_{(0)} = F_0 \text{ и } S_{(0)} = S_0.$$

Иначе говоря, обозначим через  $\Phi_0$ ,  $F_0$  и  $S_0$  соответственно потоки направленного, диффузного и общего (смешанного) излучения, только что вошедшего под поверхность моря. При этом очевидно, что

$$S_0 = F_0 + \Phi_0.$$

Решение системы (47) Иозеф (переходя от натуральных показателей к десятичным и сохраняя наши обозначения) находит в виде:

$$\begin{aligned} S &= [S_0 + n_2\Phi_0(1 - 10^{-(\varepsilon-q)z})] 10^{-qz} \\ R &= \left[ S_0 + n_2\Phi_0 \left( 1 - \frac{n_1 q + a}{n_2 q - a} 10^{-(\varepsilon-q)z} \right) \right] \frac{q-a}{q+a} 10^{-qz}. \end{aligned} \quad (48)$$

В этих равенствах обозначено:

$$n_1 = \frac{\sigma(\mu - \psi) + \psi(a - \kappa)}{\varepsilon^2 - q^2}; \quad n_2 = \frac{(a + \varepsilon)(a - \kappa + \mu - \psi)}{\varepsilon^2 - q^2}; \quad q = \sqrt{a(a + 2\mu)}. \quad (49)$$

Остальные обозначения прежние.

Физический смысл параметра  $q$  становится ясным из следующих соображений. Если в море распространяется только диффузное излучение (например, при полной облачности, при распространении дневного света на достаточно больших глубинах, при значительном удалении от источников искусственного освещения и т. д.), то уравнения (48) существенно упрощаются, так как  $\Phi_0$  становится равным нулю, а  $S_0 = F_0$ . Тогда

$$\begin{aligned} F &= F_0 \cdot 10^{-qz}, \\ R &= F_0 \frac{q-a}{q+a} \cdot 10^{-qz}. \end{aligned} \quad (50)$$

Нетрудно видеть, что первое уравнение совершенно идентично закону Бугера, а параметр  $q$  представляет собой не что иное, как показатель ослабления диффузного излучения в морской воде  $c$ , т. е.

$$q = c = \sqrt{a(a + 2\mu)}. \quad (51)$$

В заключение отметим, что уравнения (48) и (50), строго говоря, справедливы только для монохроматического света. При точных расчетах, связанных с распространением немонохроматического излучения, значения показателей  $\epsilon$  и  $q = c$  должны заменяться их средними значениями, вычисляемыми аналогично (41).

### 3. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

К числу основных задач гидрооптического исследования того или иного моря или океанического района относятся: 1) получение спектральных характеристик прозрачности воды на различных глубинах; 2) расчет светового режима моря, т. е. расчет поля излучения, создаваемого естественным светом в любой точке толщи моря.

Первая из этих задач требует для своего решения знания только показателей ослабления света в различных участках спектра, определяемых содержащейся в воде органической и неорганической взвесью и растворенными в воде окрашенными органическими веществами.

Расчет светового режима моря сводится к решению уравнения переноса излучения. Для решения этого уравнения, как это следует из предыдущего раздела и из рассматриваемых ниже зависимостей между различными гидрооптическими характеристиками, оказывается необходимым знание следующих величин: показателей поглощения, рассеяния и ослабления света в воде, индикатрисы рассеяния, показателя вертикального ослабления и коэффициента диффузного отражения моря. Ряд практических задач, связанных с видимостью подводных объектов и их маскировкой, требует, кроме того, еще знания коэффициента яркости моря. Для полного расчета светового режима моря, так же как и для ответа на многие вопросы, выдвигаемые развитием морской техники и постановкой современных гидробиологических исследований, необходимы данные о спектральных характеристиках перечисленных элементов ослабления излучения в море.

Для определения гидрооптических характеристик служат методы как непосредственные, так и лабораторные, т. е. измерения могут проводиться приборами, погружаемыми в море, или выполняться на пробах морской воды при помощи аппаратуры, находящейся в судовой лаборатории. Некоторые из только что перечисленных характеристик, такие, например, как показатель вертикального ослабления и коэффициенты яркости и диффузного отражения моря, могут определяться только из непосредственных измерений. Некоторые же, как, например, индикатриса рассеяния, наоборот, в настоящее время могут измеряться только в лабораторных условиях. Одна из важнейших оптических характеристик — спектральная прозрачность морской воды, — однозначно определяющая ее спектральные показатели ослабления, — может измеряться как непосредственно, так и лабораторными методами. Непосредственные измерения, достоинства которых совершенно очевидны, обладают в то же время тем крупным недостатком, что глубина погружения современных оптических приборов, связанных с судном кабелем, весьма ограничена и практически не

превышает 150 — 200 м и только в редких случаях (при условии применения очень легких и прочных несущих каротажных кабелей) достигает 400 — 500 м. Измерения же на пробах морской воды, получаемых из батометров, естественно, могут проводиться до очень больших глубин. Так, например, при работах на а/с «Витязь» определения оптических характеристик проводились до глубины 9400 м. При лабораторных исследованиях легче выполнять измерения в различных областях спектра, причем качество измерений значительно меньше подвержено влиянию погодных условий, чем при непосредственных наблюдениях. Крупным недостатком лабораторных исследований является невозможность детального зондирования вертикального распределения оптических характеристик, в то время как при непосредственных измерениях значения этих характеристик могут определяться очень часто. Последнее обстоятельство приобретает весьма существенное значение при исследовании слоев с повышенным содержанием фито- и зоопланктона, при определении местоположения слоев скачка плотности и т. д. Таким образом, как той, так и другой группе методов присущи определенные достоинства и недостатки, и обе эти группы отнюдь не исключают, а дополняют одна другую и при работах в море должны применяться совместно.

### 1) Непосредственные измерения оптических характеристик морской воды

#### а) Измерения подводной освещенности

Измерения подводной освещенности, как это следует из равенств (24), (25) и (26), позволяют находить следующие гидрооптические характеристики: показатель вертикального ослабления  $\alpha$ , коэффициент подводной освещенности  $\eta$  и коэффициент диффузного отражения моря  $\zeta$ . Получение последней величины, помимо измерения освещенности сверху горизонтальных поверхностей, расположенных в море на различных глубинах, требует также измерения освещенности этих поверхностей снизу, т. е. освещенности, создаваемой диффузным светом, распространяющимся в море из более глубоких слоев к его поверхности. В связи с тем, что освещенность поверхности моря может быть подвержена очень резким и сильным колебаниям, которые, безусловно, сказываются и на колебаниях подводной освещенности, все измерения этой величины должны обязательно сопровождаться измерениями наружной освещенности.

Для измерений подводной освещенности служит фотоэлектрический фотометр ФМПО-57. Прибор состоит из подводной части (рис. 2) и регистратора, находящегося на борту судна, соединенных между собой кабелем. Подводная часть прибора представляет собой герметичный корпус (1), в который вмонтировано пять фотоэлементов (2). Четыре из них обращены своей светочувствительной поверхностью кверху, т. е. к поверхности моря; а пятый — вниз к его дну. Для обеспечения возможности проведения измерений не только в белом свете, а и в трех участках видимой части спектра, из четырех фотоэлементов обращенных вверх, три закрыты светофильтрами. Все фотоэлементы помещены за защитными иллюминаторами из молочного стекла (3). Применение этих стекол имеет двойную цель. Во-первых, без них, вследствие явления полного внутреннего отражения на нижней поверхности защитных иллюминаторов, на фотоэлементы попадали бы только лучи, составляющие с вертикалью углы, меньшие, чем  $48,5^\circ$ , т. е. сосредоточенные в отвесно расположенном световом конусе с углом при вершине, равном  $97^\circ$ . Применение молочных стекол позволяет элиминировать этот эффект и фотоэлементы принимают излучение, посту-



падающее со всей полусферы. Во-вторых, помещение светофильтров под молочные стекла обеспечивает постоянство пути световых лучей при их прохождении через фильтр, вне зависимости от углового распределения энергий в падающем потоке. Без молочных стекол лучи, падающие под большими углами к вертикали, проходили бы и больший путь через фильтр и, следовательно, ослаблялись бы сильнее, чем лучи, падающие более отвесно.

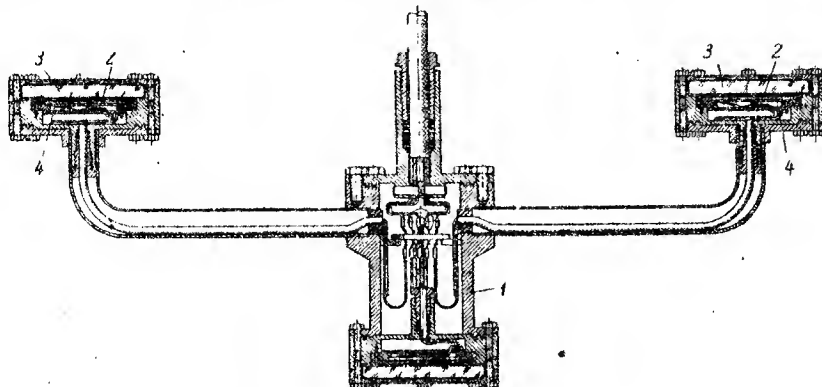


Рис. 2. Фотоэлектрический фотометр для измерения подводной освещенности ФМПО-57

В приборе применены селеновые фотоэлементы с запирающим слоем, площадью светочувствительной поверхности  $20 \text{ см}^2$ . Интегральная чувствительность каждого из фотоэлементов составляет около  $300 \text{ мкА/люмен}$ .

Регистрирующая часть прибора представляет собой потенциометр ЭПП-09 отечественного производства; очень хорошо зарекомендовавший себя при работе в морских условиях.

При наблюдениях прибор опускается в море на кабеле марки КРП 6  $\times$  1,5, имеющем, кроме токопроводящих жил, стальной сердечник. Прибор всегда опускается с борта, освещенного солнцем. Предельная глубина погружения составляет 150 м.

Для возможности проведения измерений в широком интервале освещенностей от десятков тысяч люкс в поверхностных слоях моря до незначительных освещенностей на глубинах 120 — 150 м, потенциометр снабжен системой пунтов, делящих весь диапазон измерений на пять частей.

Измерение подводной освещенности ведется с погрешностью, не превышающей 10 % от измеряемой величины.

В приборе применяются стеклянные светофильтры (4) отечественного производства — синий СС-4 (эффективная длина волны  $\lambda_{\text{эф}} = 400 \text{ мμ}$ ), зеленый ЗС-1 ( $\lambda_{\text{эф}} = 520 \text{ мμ}$ ) и красный ( $\lambda_{\text{эф}} = 604 \text{ мμ}$ ).

Электропитание прибора осуществляется от судовой сети постоянного тока напряжением 110 или 220 в.

Для одновременного измерения освещенности поверхности моря успешно применяется объективный люксметр Ю-16, выпускаемый ленинградским заводом «Вибратор». В связи с тем, что этот прибор градуируется только для сравнительно небольших освещенностей, при проведении измерений требуется применение ослабляющих нейтральных фильтров (НС-6, НС-7, НС-8, НС-9 и НС-10), обеспечивающих возможность проведения измерений при любых природных освещенностях, вплоть до их максимального значения (130 000 люкс.). Так как стеклянные фильтры имеют зеркальную поверхность, при измерениях они

помещаются между приемником объективного люксметра (в качестве которого используется также селеновый фотоэлемент) и молочным стеклом. Для измерения освещенности поверхности моря в различных областях спектра объективный люксметр снабжается комплектом светофильтров тех же самых марок, что и фотоэлектрический фотометр. При измерениях светофильтры всегда помещаются между фотоэлементом и молочным стеклом.

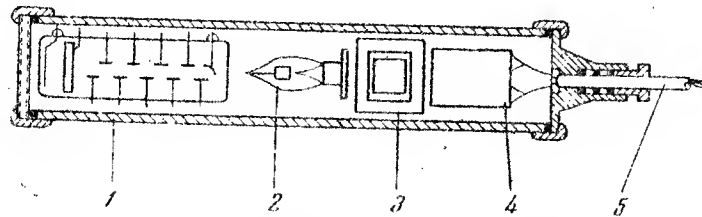


Рис. 3. Схема измерителя малых освещенностей

Пользуясь соотношениями (24), (25) и (26), по данным измерений вычисляются показатели вертикального ослабления для различных слоев моря и коэффициенты подводной освещенности и диффузного отражения моря.

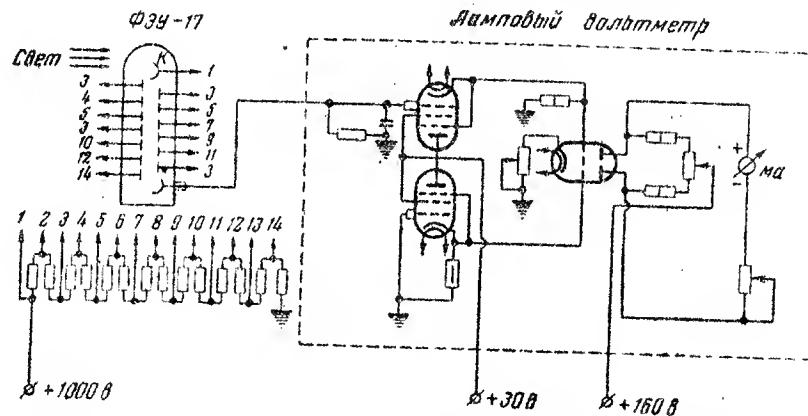


Рис. 4. Электрическая схема измерителя малых освещенностей

Для возможности измерения очень малых освещенностей на больших глубинах в ИОАНе был сконструирован и построен объективный погружаемый фотометр, приемником светового потока в котором служит фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-17 или ФЭУ-19. Прибор рассчитан на работу до глубин 400 — 500 м. Принципиальная схема прибора представлена на рис. 3. Измеряемый поток излучения естественного света принимается катодом фотоумножителя (1), представляющим собой полупрозрачный сурьмяно-цезиевый слой, нанесенный на внутреннюю поверхность колбы умножителя. Блок питания умножителя состоит из кенотрона (2), трансформатора (3) и конденсатора (4). На умножитель подается переменный ток напряжением около 1000 в для ФЭУ-17 и около 1200 в для ФЭУ-19. Сигнал фотоумножителя, пропорциональный интенсивности падающего излучения, по кабелю (5) подается на измерительный прибор, в качестве которого используется ламповый вольтметр. На рис. 4 дана электрическая схема прибора.

### б) Измерения показателя ослабления (прозрачности) морской воды

Измерения производятся при помощи фотоэлектрического фотометра — прозрачномера ФПМ-57. Прибор, оптическая схема которого показана на рис. 5, представляет собой дифференциально-нулевой фотометр, предназначенный для измерения показателя ослабления света в море как в белом свете, так и в пяти участках видимой части спектра.

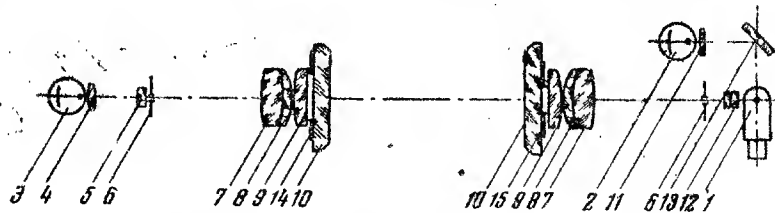


Рис. 5. Оптическая схема фотоэлектрического фотометра — прозрачномера ФПМ-57

1 — осветитель; 2 — опорный фотоэлемент; 3 — измерительный фотоэлемент; 4 и 12 — конденсоры; 5 — светофильтры; 6, 14 и 15 — диафрагмы; 7, 8 и 9 — системы линз; 10 — защитные стекла; 11 — теплоизоляционная пластинка; 13 — зеркало

Прибор состоит из подводной части и регистратора, находящегося на борту судна.

В погружаемой части прибора помещен источник искусственного света, в качестве которого используется лампа накаливания СЦ-61. После прохождения через вращающийся диск — модулятор и последующий слой морской воды световой поток от лампы попадает на фотоэлемент. Другая часть потока от лампы направляется на опорный фотоэлемент, сигнал которого при помощи электрического ослабителя уравнивается с сигналом фотоэлемента, освещенного светом, прошедшим через морскую воду. Приемники 2 и 3 представляют собой сурьмяно-цезиевые фотоэлементы СЦВ-3, подбираемые с возможно более близкими фотометрическими характеристиками.

В основу работы прибора заложен принцип следящей системы. Модулированные вращающимся диском световые потоки преобразуются фотоэлементами в переменный ток, пропорциональный падающим потокам. Переменные напряжения с измерительного и опорного фотоэлементов в противофазе подаются на катодные повторители, откуда поступают в усилитель-преобразователь. В смесителе усилителя-преобразователя напряжения измерительного и опорного фотоэлементов векторно суммируются, и результирующее напряжение сигнала (разбаланс) через усилитель поступает на синхронный детектор. Кроме того, на тот же синхронный детектор поступает и опорное напряжение. На выходе синхронного детектора возникает постоянный ток, полярность которого зависит от знака разбаланса в смесителе, а величина — пропорциональна амплитуде разбаланса. Сигнал постоянного тока с синхронного детектора поступает на усилитель регистрирующей части.

Прибор позволяет проводить измерения показателя ослабления света в море на глубинах от 0 до 150 м в водах различной мутности — от высокопрозрачных вод открытых океанических районов ( $\epsilon = 0,05 \text{ 1/м}$ ) до мутных прибрежных вод ( $\epsilon = 2,00 \text{ 1/м}$ ). Регистрация показателя ослабления ведется с относительной погрешностью, не превышающей 1%.

В качестве регистратора используется потенциометр ЭПП-09 с внесенными в его конструкцию некоторыми изменениями, позволяющими вести

регистрацию значений показателей ослабления в широком диапазоне мутностей воды примерно с одинаковой точностью.

Для возможности измерений прозрачностей воды на больших глубинах прибор снабжается съемной кюветой, помещаемой между осветителем и фотоприемником. В этом случае прибор находится на борту судна, и кювета заполняется водой из батометров. Объем кюветы составляет всего

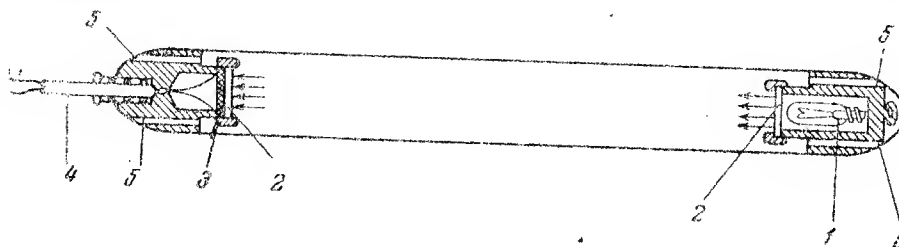


Рис. 6. Буксируемый прозрачномер ИОАН

500 см<sup>3</sup>, что обеспечивает проведение массовых измерений при взятии стандартных гидрологических серий.

Подводная и регистрирующая части прибора связаны между собой кабелем марки КРП 6 × 1,5.

Электропитание прибора осуществляется от судовой сети переменного тока напряжением 220 в.

Для возможности непрерывной регистрации прозрачности воды в поверхностных слоях моря на ходу судна Институтом океанологии сконструирован буксируемый прозрачномер (рис. 6). Прибор представляет собой объективный фотометр, в котором световой поток, посылаемый лампой (1), после прохождения слоя воды толщиной в 1 м принимается фотосопротивлением ФСК-1 (3). Лампа и фотосопротивление закрыты защитными стеклянными иллюминаторами (2). Подводная часть прибора соединяется с регистратором, в качестве которого также используется потенциометр ЭИИ-09, каротажным кабелем (4) марки КТШ-03, имеющим, кроме токопроводящих медных жил, несущие стальные жилы. Вырезы (5) в корпусе прибора выполнены таким образом, чтобы обеспечить свободный доступ воды в прибор и в то же время не допустить попадания естественного света на фотоэлемент при работе с прибором в светлое время суток.

#### в) Измерения коэффициента яркости моря

Измерения производятся при помощи гидрофотометра ИФТ-19. Оптическая схема его показана на рис. 7. Прибор представляет собой визуальный фотометр, основанный на уравнивании яркостей двух полей, одно из которых создается светом, выходящим из толщи моря, а другое — естественным светом солнца и неба, освещающим горизонтальную пластинку матированного молочного стекла. Прибор снабжен трубой, нижний конец которой погружается под поверхность моря. Свет, идущий из толщи моря, через линзы оборачивающей системы поступает в фотометрическую призму, служащую для уравнивания яркостей обеих полей. Уравнивание производится перемещением молочного стекла при помощи рычажной системы. Отсчеты ведутся через окуляр по секторной шкале, освещаемой через иллюминатор. Для возможности проведения измерений в различных участках спектра прибор снабжен револьверной диафрагмой со сменными фильтрами. Таким образом, помимо измерений в белом свете, прибор

дает возможность вести измерения в следующих областях видимой части спектра: синей ( $\lambda_{\text{эф}} = 459 \text{ м}\mu$ ), сине-зеленой ( $\lambda_{\text{эф}} = 494 \text{ м}\mu$ ), зеленой ( $\lambda_{\text{эф}} = 528 \text{ м}\mu$ ), желто-зеленой ( $\lambda_{\text{эф}} = 556 \text{ м}\mu$ ), оранжевой ( $\lambda_{\text{эф}} = 587 \text{ м}\mu$ ) и красной ( $\lambda_{\text{эф}} = 600 \text{ м}\mu$ ). Отсчеты по шкале прибора переводятся в коэффициенты яркости моря с применением данных градуировок прибора.

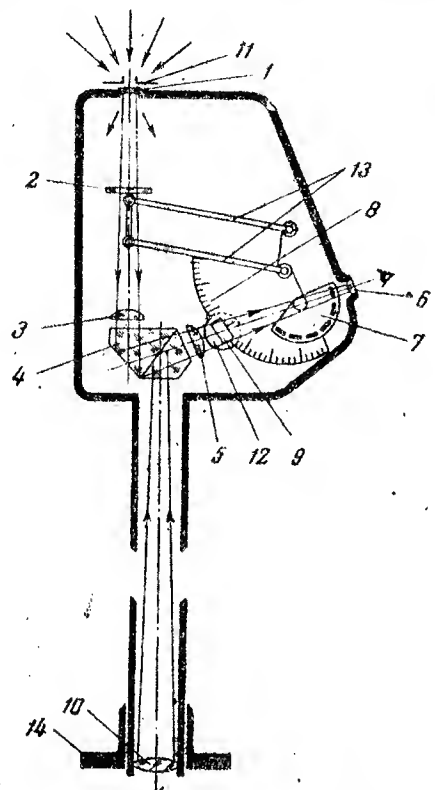


Рис. 7. Оптическая схема гидрофотометра ИФТ-19

- 1 — пластина матированного молочного стекла; 2 — подвижное молочное стекло; 3 и 5 — линзы; 4 — фотометрическая призма; 6 — окуляр; 7 — сменные светофильтры; 8 — секторная шкала; 9 — направляющая призма; 10 — линза оборачивающей системы; 11 — диафрагма; 12 — иллюминатор; 13 — рычажная система; 14 — фланец

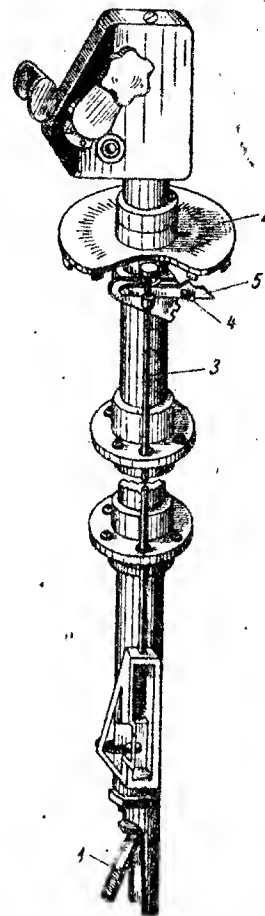


Рис. 8. Приспособление для измерения индикатрис яркости моря

Относительная погрешность определения коэффициента яркости моря составляет от 5 до 15 %, в зависимости от значения измеряемой величины.

Для измерения коэффициентов яркости излучения, выходящего из толщи моря не только вертикально вверх, но и под различными углами к вертикали и в различных азимутах по отношению к солнцу, прибор снабжается специальным приспособлением (рис. 8), заменяющим нижнее концевое колено трубы прибора. Приспособление состоит из плоского зеркала (1), устанавливаемого под входным иллюминатором трубы прибора, и механизма для его поворота и качания. Для проведения измерений в различных азимутах зеркало поворачивается штурвалом (2), перемещающим это зеркало при помощи ходового валика (3). Штурвал

снабжен лимбом, показывающим азимут, в котором ведутся измерения. Установка требуемого наклона зеркала осуществляется при помощи рукоятки (4). Фиксатор (5) закрепляет зеркало в трех положениях, позволяющих измерять коэффициент яркости излучения, идущего из глубоких слоев моря к его поверхности, под углами к вертикали 30, 60 и 90°.

Измерения производятся на якорных и дрейфовых станциях с борта, освещенного солнцем. Для проведения измерений прибор крепится к борту корабля специальными опорными платами. При работе с высокобортовых судов, когда максимальная длина прибора (3,5 м) оказывается недостаточной, можно рекомендовать крепление прибора за бортом на навесной беседке — трапе, как это делалось в практике экспедиционных работ на э/с «Витязь». Система такого крепления прибора представлена на рис. 9.

## 2) Лабораторные измерения оптических характеристик морской воды

Измерения производятся при помощи спектрогидрофелометра-прозрачномера ИФ-25<sup>1</sup>. Прибор, общий вид которого изображен на рис. 10, позволяет определять в белом свете и шести различных участках видимой части спектра коэффициенты пропускания морской воды и ее показатели яркости для различных углов рассеяния. По этим данным определяются основные оптические характеристики воды — показатели рассеяния и ослабления и индикатриса рассеяния. Эти характеристики, в свою очередь, дают возможность определить значения показателя поглощения и оценить долю поглощения и рассеяния в общем ослаблении направленного потока в морской воде. Измерения могут выполняться как в неполяризованном, так и в поляризованном свете.

Прибор представляет собой визуальный фотометр, в котором яркость пропущенного или рассеянного водой света сравнивается с известной заранее яркостью пластины молочного стекла. Оптическая схема прибора представлена на рис. 11.

Кювета прибора заполняется исследуемой водой, которая либо прокачивается насосом, либо берется батометрами. Осветитель прибора состоит из лампы накаливания, конденсора, диафрагм и объектива. Осветитель укреплен на поворотном лимбе, закрывающем кювету прибора и вращающимся вокруг оси.

Для измерений показателя ослабления осветитель ставится в крайнее заднее положение, и свет от него, пройдя толщу воды в приборе, отражается от сферического зеркала, после чего достигает объектива фотометра, в фокальной плоскости которого помещено устройство для создания полей сравнения. Проведение измерений яркости света, рассеянного под различными углами, достигается поворотом осветителя на тот или иной угол. В этом случае объектив фотометра освещается светом, рассеянным толщей воды, лежащей в снопе параллельных лучей, идущих от осветителя.

Ветвь сравнения фотометра состоит из поворотного осветителя, включающего в себя лампу и молочное стекло, из неподвижного молочного стекла и фотометрической призмы.

Яркости рассеянного или пропущенного водой света сравниваются с яркостью неподвижного молочного стекла. Таким образом, одно из полей сравнения освещается светом, прошедшим через воду, а другое —

<sup>1</sup> После сдачи статьи в печать на основе прибора ИФ-25 был разработан и изготовлен новый усовершенствованный спектрогидрофелометр СГН-57.



осветителем в ветви сравнения фотометра. На уравнивании яркостей этих полей и основаны измерения.

Измерительное устройство смонтировано на корпусе фотометра, выполненом в виде литой чаши, являющейся юветой прибора. На этом же корпусе закреплены объектив фотометра, окуляр и светофильтры. При измерениях осветитель фотометра перемещается с помощью рычажно-винтового механизма, приводимого в движение барабаном. Вращением барабана в ту или другую сторону добиваются равенства яркостей фотометрических полей, после чего по навесным на барабан делениям считывается отсчет.

Яркость рассеянного в морской воде света может меняться в зависимости от содержания взвеси и различия в углах рассеяния в сотни тысяч и даже миллионы раз. Для возможности измерения яркостей в столь широком диапазоне в измерительной ветви фотометра помещаются сменные диафрагмы, а в ветви сравнения — дополнительный ослабитель. Смена диафрагм обуславливает необходимость наличия в приборе двух зрачков выхода — круглого и сегментного.

Для проведения измерений в поляризованном свете перед объективным осветителем устанавливается насадка-поляризатор, а перед зрачком выхода помещается насадка-анализатор.

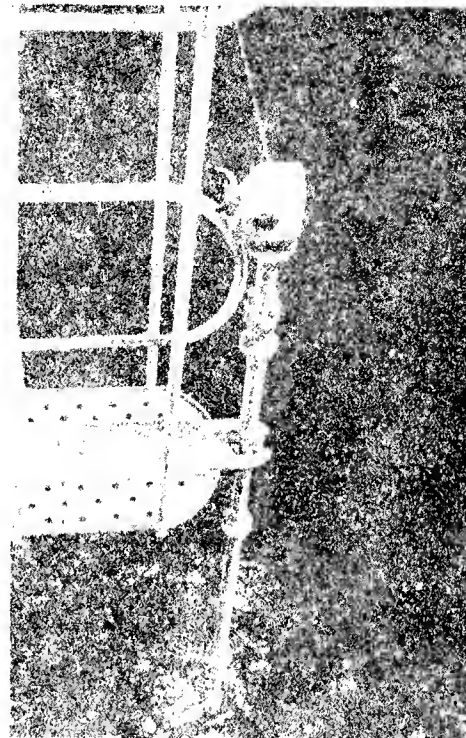


Рис. 9. Крепление гидрофотометра НФТ-19 на высокобортом судне

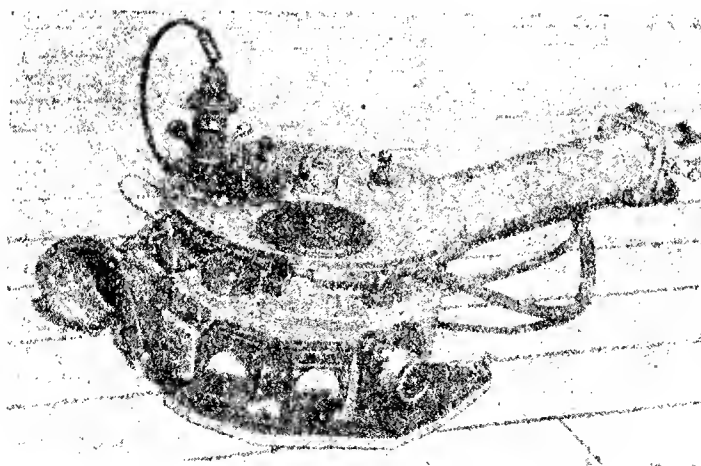


Рис. 10. Общий вид спектрогидрофотометра прозрачного НФ-25



Лампа осветителя прибора включается последовательно с лампой фотометра, что обеспечивает одинаковый режим их работы вне зависимости от возможных колебаний напряжения в источнике питания. Подаваемое на прибор напряжение и сила тока, идущего через лампы, фиксируются вольтметром и амперметром. Электропитание прибора осуществляется постоянным током напряжением 16 в.

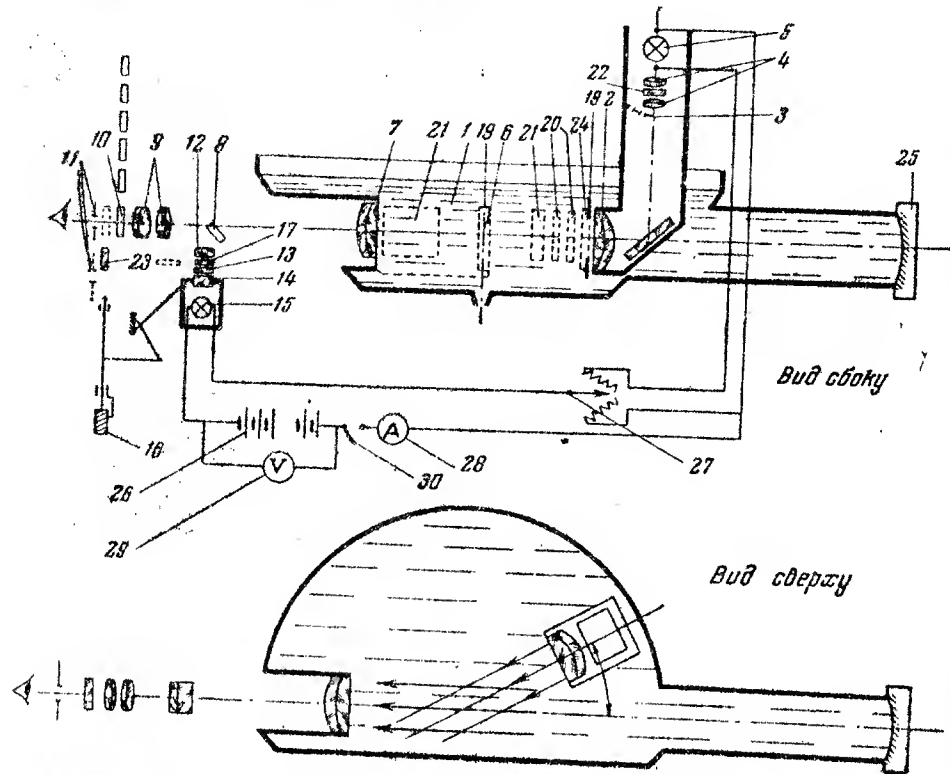


Рис. 11. Оптическая схема спектрогидрофелометра-прозрачномера ИФ-25

1 — ювета прибора; 2 — объектив осветителя; 3 — диафрагмы; 4 — конденсор; 5 и 15 — лампы накаливания; 6 — направляющий пистолет (ось юветы прибора); 7 — объектив фотометра; 8 — фотометрическая призма; 9 — окуляр; 10 — светофильтры; 11 — сменные экраны выхода; 12, 13 и 14 — молочные стекла фотометра; 16 — отсчетный барабан; 17 — дополнительный ослабитель; 18 — сменные фильтры; 21 — заполняющая; 22 — молочное стекло осветителя; 23 — градуировочные нейтральные фильтры; 24 — насадка-анализатор; 25 — сферическое зеркало; 26 — аккумуляторы; 27 — реостат; 28 — амперметр; 29 — вольтметр; 30 — переключатель

Для проведения измерений в различных участках спектра прибор снабжен комплектом светофильтров, состоящим из шести образцов — синего ( $\lambda_{\text{эф}} = 475 \text{ м}\mu$ ), зеленого ( $\lambda_{\text{эф}} = 520 \text{ м}\mu$ ), желто-зеленого ( $\lambda_{\text{эф}} = 544 \text{ м}\mu$ ), оранжевого ( $\lambda_{\text{эф}} = 568 \text{ м}\mu$ ) и двух красных ( $\lambda_{\text{эф}} = 604 \text{ м}\mu$  и  $\lambda_{\text{эф}} = 648 \text{ м}\mu$ ).

Водозаборная часть прибора состоит из насоса и системы шлангов для подачи воды в прибор и ее слива. Центробежный насос приводится в действие электромотором МУ-80, работающим как на переменном, так и на постоянном токе напряжением 110 и 220 в. Насос вполне обеспечивает подъем воды на 3—4 м от ватерлинии судна.

Общий объем воды в приборе составляет около 3 л, что несколько затрудняет исследования оптических характеристик глубоких слоев, когда

прокачка воды насосом невозможна из-за недостаточной длины шланга и пробы приходится брать батометрами.

Отсчеты, снятые с барабана прибора, при помощи соответствующих градуировочных графиков переводятся в коэффициенты пропускания и показатели яркости воды, по которым затем, пользуясь равенствами (7), (16), (19) и (20), вычисляются показатели ослабления и рассеяния света в воде и строится индикатриса рассеяния.

Погрешность определения показателя ослабления колеблется от 3—5% для мутных вод до 12—15% для чистых вод открытых океанических районов. Относительная погрешность определения показателя рассеяния в среднем составляет около 15%.

#### 4. НЕКОТОРЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ГИДРООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Согласно уравнению (43) Амбарцумяна,

$$I = \frac{b(\theta) e^{-\kappa r}}{1 + k \cos \theta},$$

интенсивность диффузного излучения меняется с глубиной по экспоненциальному закону, причем показатель ослабления в этом случае в  $\kappa$  раз отличается от показателя ослабления направленного излучения  $\epsilon$ . Тогда, обозначая по-прежнему показатель ослабления диффузного потока через  $c$ , имеем:

$$c = \kappa \epsilon. \quad (52)$$

Выше уже упоминалось, что параметр  $K$  может быть определен из равенства (44), если известны индикатриса рассеяния и соотношение между рассеянием и общим ослаблением. В связи с тем, что этот параметр играет существенную роль при проведении многих практических расчетов, рассмотрим возможность простого и быстрого определения этой величины через другие оптические характеристики.

Подставим в равенство (24), определяющее показатель вертикального ослабления  $\alpha$ , значения  $S_{z_1}$  и  $S_{z_2}$ , полученные для глубин  $z_1$  и  $z_2$  из первого уравнения системы (48). Заменяя показатель  $q$  равным ему показателем  $c$  (51) и обозначив

$$10^{-(\epsilon-c)z_1} = A \text{ и } 10^{-(\epsilon-c)z_2} = B,$$

находим:

$$\alpha = c - \frac{1}{z} \lg \left\{ 1 - \frac{n_2 \Phi_0}{S_0} (A + B) \left[ 1 - \frac{n_2}{S_0} (1 - B) + \frac{n_2 \Phi_0}{S_0} (1 - B^2) \right] \right\}. \quad (53)$$

Из этого выражения следует, что показатель вертикального ослабления  $\alpha$  не является величиной постоянной, а с увеличением глубины (величин  $z_1$  и  $z_2$ ) и с возрастанием толщины слоя (величины  $z$ ) приближается к своему граничному значению  $c$ . Показатель  $\alpha$  становится в точности равным показателю ослабления диффузного излучения  $c$  при условии освещения поверхности моря только рассеянным светом или на достаточно больших глубинах, куда не проникает прямое излучение солнца ( $\Phi_0 = 0$ ). Тогда, вместо (52), имеем:

$$\kappa = \frac{\alpha}{\epsilon}. \quad (54)$$

Пользуясь соотношениями (30) и (58), легко найти показатель рассеяния диффузного излучения  $b$ :

$$b = \frac{2a\zeta}{1+\zeta}, \quad (60)$$

а также его компоненты (31) — показатели рассеяния вперед  $\xi$  и назад  $\mu$ . Решая преобразованное уравнение Гамбурцева (56) относительно  $\mu$  и подставляя в него значение  $a$  из (58), находим:

$$\mu = \frac{2a\zeta}{1-\zeta^2}. \quad (61)$$

Показатель рассеяния диффузного излучения вперед  $\xi$  оказывается очень близким к нулю. Действительно, так как  $\alpha = a + b$  (30) и, в свою очередь,  $b = \xi + \mu$  (31), то  $\alpha = a + \mu + \xi$ . Вместе с тем мы видели, что  $\alpha = a + \mu$ . Таким образом, в первом приближении, как это и следует из равенства (60), ослабление распространяющегося в море диффузного потока определяется только рассеянием назад и истинным поглощением.

Полученные равенства позволяют вычислять значения целого ряда оптических характеристик через легко определяемые из измерений величины показателей вертикального ослабления  $\alpha$  и коэффициента диффузного отражения моря  $\zeta$ . Пользуясь данными одновременных измерений ослабления потока естественного света и элементов ослабления направленного потока (прозрачности морской воды и ее индикатрис рассеяния), можно получать все необходимые величины для расчета характеристик светового режима моря. Эти же расчеты с успехом могут быть применены для определения характеристик потоков излучения, идущих в море в направлении прожекторного луча и обратно. Такие расчеты имеют несомненный интерес при решении задач, связанных с освещением при аварийно-спасательных работах, с определением видимости подводных объектов, с обеспечением работы подводной телевизионной аппаратуры, с определением оптимальных условий производства аэрофотосъемки на море и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Амбарцумян В. А. К вопросу о диффузном отражении света мутной среды. ДАН СССР, 1943, т. 37, № 8.  
 Амбарцумян В. А. Новый способ расчета рассеяния света в мутной среде. «Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз.», 1944, № 3.  
 Гамбурцев А. Г. К вопросу о цветности моря. М., 1924.  
 Гершуни А. А. Избранные труды по фотометрии и фототехнике. М., 1958.  
 Сена Л. А. Единицы измерения физических величин. Гостехиздат, 1948.  
 Joseph J. Untersuchungen über Ober-und Unterlichtmessungen im Meere und über ihrem Zusammenhang mit Durchsichtigkeitmessungen. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, B. 3, 1950.